

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



**VISOKOŠOLSKI
STROKOVNI ŠTUDIJ
PRVE STOPNJE
OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO
MODUL
KONSTRUKTIVA**

Kandidatka:

DAVID KOKALJ

**POENOSTAVLJENE RAČUNSKE METODE
POŽARNOVARNEGA PROJEKTIRANJA AB NOSILCEV**

Diplomska naloga št.: 10/OG-MK

**SIMPLIFIED CALCULATION METHODS FOR THE FIRE
DESIGN OF RC BEAMS**

Graduation thesis No.: 10/OG-MK

Mentor:
Doc.dr. Sebastjan Bratina

Predsednik komisije:
Doc.dr. Tomo Cerovšek

Ljubljana, 2011

IZJAVE

Podpisani **DAVID KOKALJ** izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom:
“POENOSTAVLJENE RAČUNSKE METODE POŽARNOVARNEGA PROJEKTIRANJA AB NOSILCEV”.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici..

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 2011

(podpis kandidata)

IZJAVA O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali učitelji konstrukcijske smeri:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 51-3:614.841.45(043.2)
Avtor: David Kokalj
Mentor: doc. dr. Sebastjan Bratina, univ. dipl. inž. gradb.
Naslov: Poenostavljene računske metode požarnovarnega projektiranja AB nosilcev
Obseg in oprema: 54 str., 12 pregl., 23 sl., 60 en.
Ključne besede: požarna odpornost, poenostavljene računske metode, AB nosilec, temperatura

Izvleček:

V diplomski nalogi predstavimo poenostavljeni računski metodi za oceno požarne odpornosti armiranobetonskih (AB) nosilcev skladno s standardom SIST EN 1992-1-2:2005. To sta metoda izoterme 500°C in metoda območij. Pri obeh metodah je požarna analiza razdeljena v dva matematično nepovezana dela, na temperaturni del in mehanski del. S temperaturno analizo določimo razvoj temperature v nosilcu glede na merodajni toplotni vpliv in ob upoštevanju temperaturno odvisnih toplotnih in mehanskih lastnosti materialov. Ta del analize je enak pri obeh poenostavljenih metodah. V drugem delu požarne analize ob upoštevanju zmanjšanega prečnega prereza in reduciranih trdnosti armaturnih palic določimo osno-upogibno odpornost karakterističnega prečnega prereza AB nosilca. Pri metodi izoterme 500°C reducirane dimenzije prereza določimo na podlagi poteka izoterme 500°C. Pri metodi območij širino poškodovanega območja izračunamo s pomočjo razdelitve prečnega prereza na več območij, za katere ocenimo temperaturne pogoje. Metoda območij je natančnejša od metode izoterme 500°C. V računskem primeru s predstavljenima metodama ocenimo požarno odpornost prostoležečega AB nosilca, ki se nahaja nad dnevno bivalnim prostorom v enodružinski stanovanjski hiši. Ugotovimo, da se požarni odpornosti po obeh metodah minimalno razlikujeta.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 51-3:614.841.45(043.2)
Author: David Kokalj
Supervisor: Assist. Prof. Sebastjan Bratina, Ph. D.
Title: Simplified calculation methods for the fire design of RC beams
Notes: 54 p., 12 tab., 23 fig., 60 eq.
Key words: fire resistance, simplified calculation methods, RC beam, temperature

Abstract:

This thesis presents simplified calculation methods for evaluating the fire resistance of reinforced concrete (RC) beams in accordance with the SIST EN 1992-1-2:2005 standard. The methods presented are the 500°C isotherm method and the zone method. With both methods, the fire analysis is divided into two mathematically separate steps: thermal and mechanical. Thermal analysis is used to predict temperature development in the beam, taking into consideration the relevant heat source and temperature-dependent thermal and mechanical properties of materials. This step of the analysis is the same for both simplified methods. In the second part of the fire analysis, the axial and bending resistance of the characteristic cross section of the RC beam is determined, taking account of the reduced cross section and the strength reduction of reinforcing bars. The 500°C isotherm method determines the reduced dimensions of cross sections, based on the 500°C isotherm. Using the zone method, the size of the affected area is calculated by dividing the cross section into several zones, for which the temperature conditions are evaluated. The zone method is more accurate than the 500°C isotherm method. In the calculation example, the fire resistance of the simply supported RC beam located over the living space in a single-family house is evaluated using the two methods. It is established that the fire resistance results acquired by both methods differ only marginally.

ZAHVALA

Najprej gre iskrena zahvala mojemu mentorju, doc. dr. Sebastjanu Bratini, univ. dipl. inž. gradb., ki mi je z nasveti pomagal in me usmerjal pri izdelavi diplomske naloge.

Iskreno se zahvaljujem v prvi vrsti tudi ženi Nataši in hčerki Anji ter staršem in ostalim domačim za vso pomoč in podporo tako v času izdelave diplomske naloge, kakor tudi tekom celotnega študija.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	POSTOPKI PROJEKTIRANJA POŽARNOVARNIH KONSTRUKCIJ V SKLADU S STANDARDOM SIST EN 1992-1-2:2005	3
2.1	Metode dokazovanja.....	3
2.2	Kombinacija vplivov za nezgodna projektna stanja	3
2.3	Projektne vrednosti lastnosti materiala	4
2.3.1	Mehanske lastnosti materiala.....	4
2.3.2	Toplotne lastnosti materiala.....	4
2.4	Postopki projektiranja požarnovarne konstrukcij.....	4
3	POENOSTAVLJENE RAČUNSKE METODE POŽARNOVARNEGA PROJEKTIRANJA AB NOSILCEV.....	7
3.1	Splošno.....	7
3.2	Požarni scenarij.....	7
3.2.1	Nominalne (nazivne) požarne krivulje.....	9
3.2.1.1	Standardna krivulja temperatura – čas.....	9
3.2.1.2	Požarna krivulja zunanjega požara.....	9
3.2.1.3	Ogljikovodikova krivulja temperatura – čas.....	9
3.2.2	Modelirane požarne krivulje	10
3.2.2.1	Poenostavljeni požarni modeli: parametrična krivulja temperatura – čas...	10
3.2.2.2	Natančnejši požarni modeli	15
3.2.2.3	Enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru.....	15
3.3	Temperaturna analiza.....	17
3.3.1	Splošno.....	17
3.3.2	Prevajanje toplote po trdni snovi	17
3.3.3	Toplotne in mehanske lastnosti betona povišanih temperaturah	19
3.3.3.1	Specifična toplota betona c_p	19
3.3.3.2	Gostota betona ρ_c	20
3.3.3.3	Toplotna prevodnost betona λ_c	20
3.4	Mehanska analiza.....	21
3.4.1	Metoda izoterme 500°C.....	21
3.4.1.1	Načela in področja uporabe.....	21
3.4.1.2	Ocena požarne odpornosti osno – upogibno obremenjenega AB prečnega prereza	22
3.4.2	Metoda območij.....	25

3.4.2.1	Načela in področja uporabe	25
3.4.2.2	Ocena požarne odpornosti osno – upogibno obremenjenega AB prečnega prereza	25
3.4.3	Zmanjšanje trdnosti betona in jekla pri povišanih temperaturah	27
4	RAČUNSKI PRIMER: POŽARNA ODPORNOST AB PROSTOLEŽEČEGA NOSILCA.....	29
4.1	Osnovni podatki	29
4.1.1	Geometrijski in materialni podatki ter podatki o obtežbi nosilca	30
4.2	Dimenzioniranje armiranobetonskega nosilca v osnovnih projektnih stanjih	31
4.2.1	Projektiranje nosilca v mejnih stanjih nosilnosti (MSN)	31
4.2.1.1	Projektna obtežba in obremenitev nosilca	31
4.2.1.2	Dimenzioniranje na upogibno obremenitev	31
4.2.1.3	Dimenzioniranje na strižno obremenitev	32
4.2.1.4	Izbrana vzdolžna upogibna in strižna armatura nosilca	34
4.2.2	Projektiranje nosilca v mejnih stanjih uporabnosti (MSU) – kontrola povosov	34
4.2.2.1	Projektna obtežba nosilca	34
4.2.2.2	Trenutni navpični pomik	35
4.2.2.3	Končni navpični pomik	35
4.3	Požarni scenarij	35
4.3.1	Požarni sektor	35
4.3.2	Projektna vrednost gostote požarne obremenitve	36
4.3.3	Parametrična požarna krivulja temperatura – čas	37
4.3.4	Enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru	38
4.4	Temperaturni del požarne analize	39
4.5	Mehanska analiza	41
4.5.1	Projektna obtežba in obremenitev nosilca	41
4.5.2	Račun požarne odpornosti AB nosilca z metodo izoterme 500°C	41
4.5.2.1	Mehanska analiza pri R 60	42
4.5.2.2	Mehanska analiza pri R 90	43
4.5.2.3	Mehanska analiza pri R 120	44
4.5.3	Račun požarne odpornosti AB nosilca z metodo območij ..	45
4.5.3.1	Mehanska analiza pri R 60	45
4.5.3.2	Mehanska analiza pri R 90	48
4.5.3.3	Mehanska analiza pri R 120	49

5	ZAKLJUČKI.....	51
	VIRI.....	52

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Karateristična gostota požarne obtežbe $q_{f,k}$ v MJ/m ²	13
Preglednica 2:	Faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na velikost sektorja δ_{q1}	13
Preglednica 3:	Faktor, ki upošteva uporabo različnih aktivnih ukrepov gašenja δ_{ni}	14
Preglednica 4:	Faktor pretvorbe k_b v odvisnosti od toplotnih lastosti materiala oboda.....	16
Preglednica 5:	Odvisnost prestopnega koeficienta α_c od požarne krivulje skladno s SIST EN 1991-1-2:2004	18
Preglednica 6:	Najmanjša širina prečnega prereza v odvisnosti od požarne odpornosti (za izpostavljenost standardnemu požaru).....	22
Preglednica 7:	Najmanjša širina prečnega prereza v odvisnosti od gostote požarne obtežbe (za izpostavljenost parametričnemu požaru)	22
Preglednica 8:	Izračun vrednosti faktorja b za opečni zid	36
Preglednica 9:	Račun projektne vrednosti gostote požarne obremenitve $q_{f,d}$	36
Preglednica 10:	Izračun osnovnih parametrov parametrične krivulje	37
Preglednica 11:	Enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru $t_{e,d}$	38
Preglednica 12:	Temperature v armaturnih palicah	40

KAZALO SLIK

Slika 1:	Poškodbe armiranobetonskega elementa med požarom	1
Slika 2:	Požarna krivulja naravnega požara	8
Slika 3:	Lastnosti požarnega sektorja.....	9
Slika 4:	Normalne (nazivne) požarne krivulje v skladu s standardom SIST EN 1991-1-2:2004.....	10
Slika 5:	Parametrična krivulja v primerjavi z nominalnimi (nazivnimi) požarnimi krivuljami.....	15
Slika 6:	Specifična toplota betona v skladu s standardom SIST EN 1992-1-2:2005...	19
Slika 7:	Gostota betona v skladu s standardom SIST EN 1992-1-2:2005.....	20
Slika 8:	Toplotna prevodnost betona v skladu s standardom SIST EN 1992-1-2:2005	21
Slika 9:	Izoterma 500°C pri upogibno obremenjenem AB prerezu, izpostavljenemu požaru s treh strani	22
Slika 10:	Upogibna odpornost AB prečnega prereza v požarnem projektnem stanju ...	24
Slika 11:	Razdelitev prečnega prereza, izpostavljenega požaru na obeh straneh, na vzporedna območja enakih debelin	26
Slika 12:	Poškodovano območje prečnega prereza, ko je prerez izpostavljen požaru s treh strani	26
Slika 13:	Reducirane dimenzije učinkovitega prečnega prereza	27
Slika 14:	Redukcijski faktor za zmanjšanje karakteristične tlačne trdnosti betona pri povišanih temperaturah v skladu s standardom SIST EN 1992-1-2:2005.....	28
Slika 15:	Redukcijski faktor za zmanjšanje karakteristične trdnosti jekla za armiranje pri povišanih temperaturah v skladu s standardom SIST EN 1992-1-2:2005..	28
Slika 16:	Tloris požarnega sektorja s prikazom obravnavanega armiranobetonskega nosilca	29
Slika 17:	Nosilna konstrukcija stropa - omnia prednapete rebraste plošče celer-cem ...	29
Slika 18:	Prikaz geometrije nosilca in razporeditve obtežbe.....	30
Slika 19:	Prikaz izbrane armature v prečnem prerezu nosilca.....	34
Slika 20:	Parametrična krivulja temperatura – čas za dnevno sobo s tlorisno površino $A_f = 31 \text{ m}^2$	38
Slika 21:	Vpliv požara na nosilec	39
Slika 22:	Temperaturni profili za pravokotni prečni prerez dimenzij 25/35 cm za izpostavljenost standardnemu požaru s treh strani R 60, R 90 in R 120 z vrisano armaturo.....	40
Slika 23:	Razdelitev polovice prečnega prereza AB nosilca na 3 vzporedna območja z enako debelino	46

1 UVOD

Precej razširjeno je mnenje, da je beton neomejeno požarno odporen. Vendar to ne drži, saj se z naraščanjem temperature spreminjajo lastnosti vgrajenih materialov tudi v armiranobetonski (AB) konstrukciji. Z višanjem temperature se napetosti in deformacije v betonu in armaturi povečujejo, pojavijo se razpoke, lahko pride do odpadanja betona ali pa celo do eksplozivnega luščenja, kar ne nazadnje povzroči celo porušitev konstrukcije. Zato moramo z ustreznim projektiranjem zagotoviti zadostno požarno varnost konstrukcije. Tehnična smernica TSG-1-001:2010 določa, da morajo biti stavbe projektirane in grajene tako, da njihova nosilna konstrukcija ob požaru določen čas ohrani potrebno nosilnost.

Požarno odpornost gradbenih konstrukcij lahko določimo na dva načina, eksperimentalno ali računsko. Pogosteje se poslužujemo računskih metod, saj so eksperimenti relativno dragi in zamudni, medtem ko so računske metode vse natančnejše in zanesljivejše. Imenujemo jih tudi požarne analize. Evropski standard SIST EN 1992-1-2:2005 loči napredne in poenostavljene računske metode požarne analize. Napredne računske metode nam omogočajo realistično analizo konstrukcije med požarom. So matematično zelo zahtevne, zato jih uporabljamo le izjemoma. V običajni inženirski praksi so primernejše poenostavljene računske metode, ki pa so namenjene le grobi oceni požarne odpornosti posameznih konstrukcijskih elementov, kot so to nosilci ali stebri, pri osni, upogibni in kombinirani osno upogibni obremenitvi. Za oceno požarne odpornosti nosilcev standard podaja dve metodi. Obe temeljita na zmanjšanju prečnega prereza zaradi poškodovanosti betona med požarom. To sta metoda izoterme 500°C in metoda območij. Metoda območij je računsko nekoliko zahtevnejša. V diplomski nalogi obe metodi detajlneje predstavimo ter jih na primeru prostoležečega AB nosilca tudi uporabimo.



Slika 1: Poškodbe armiranobetonskega elementa med požarom

Diplomska naloga ima poleg uvoda še štiri poglavja. V drugem poglavju predstavimo postopek projektiranja požarnovarnih konstrukcij v skladu s standardom SIST EN 1992-1-2:2005. V tretjem poglavju podrobneje predstavimo poenostavljene računske metode, ki sta namenjeni približni oceni požarne odpornosti AB nosilcev, t.j. metodo izoterme 500°C in metodo območij. V četrtem poglavju s predstavljenima metodama ocenimo požarno odpornost prostoležečega AB nosilca, ki se nahaja nad dnevno bivalnim prostorom v enodružinski stanovanjski hiši. Na koncu podajamo še zaključke.

2 POSTOPKI PROJEKTIRANJA POŽARNOVARNIH KONSTRUKCIJ V SKLADU S STANDARDOM SIST EN 1992-1-2:2005

2.1 Metode dokazovanja

Skladno s standardom SIST ISO 8421-1 je požarna odpornost elementa gradbene konstrukcije sposobnost, da določen čas izpolnjuje zahteve glede nosilnosti (kriterij R), celovitosti (kriterij E) in/ali toplotne izolativnosti (kriterij I).

Pri analizi AB konstrukcije oziroma njenega dela moramo dokazati, da v celotnem času t izpostavljenosti požaru velja:

$$E_{d,t,fi} \leq R_{d,t,fi} , \quad (1)$$

kjer je $E_{d,t,fi}$ projektni učinek zunanjih vplivov v požarnem projektnem stanju, ki ga določajo notranje sile in momenti, $R_{d,t,fi}$ pa je pripadajoča projektna odpornost v projektnem požarnem stanju (SIST EN 1992-1-2:2005).

Zahtevo (1) lahko zapišemo tudi v časovnem območju:

$$t_{d,fi} \geq t_{fi,requ} . \quad (2)$$

Pri tem je $t_{d,fi}$ projektna vrednost požarne odpornosti, $t_{fi,requ}$ pa je zahtevan čas požarne odpornosti.

Lahko pa zahtevo (1) zapišemo tudi v temperaturnem območju:

$$T_d \leq T_{cr,d} . \quad (3)$$

Pri tem je T_d projektna vrednost temperature materiala, $T_{cr,d}$ pa je projektna vrednost kritične temperature materiala.

Dokaz požarne varnosti konstrukcije oziroma njenega dela temelji na uporabi ustreznega računskega modela in obtežbe. Računski model mora temeljiti na uveljavljeni inženirski teoriji in praksi ter odražati pričakovano obnašanje konstrukcije oziroma njenega dela med požarom.

2.2 Kombinacija vplivov za nezgodna projektna stanja

Kombinacijo zunanjih vplivov v požarnem projektnem stanju $E_{d,t,fi}$ zapišemo v skladu s standardom SIST EN 1990:2004 z izrazom:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_d + (\psi_{1,1} \text{ ali } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} , \quad (4)$$

kjer so $G_{k,j}$ stalni vplivi, A_d je vpliv požara, $Q_{k,1}$ je prevladujoči spremenljivi vpliv, $Q_{k,i}$ ($i > 1$) pa so drugi spremenljivi vplivi zunanjih obtežb. Vrednosti faktorjev za navidezno stalno vrednost

spremenljivega vpliva ψ_1 in ψ_2 so podane v standardu SIST EN 1990:2004. Skladno z nacionalnim dodatkom k standardu vse spremenljive vplive kombiniramo s faktorjem ψ_2 .

2.3 Projektne vrednosti lastnosti materiala

2.3.1 Mehanske lastnosti materiala

Projektne vrednosti mehanskih (trdnostnih in deformacijskih) lastnosti materiala $X_{d,fi}$ določimo na naslednji način:

$$X_{d,fi} = k_T \cdot \frac{X_k}{\gamma_{M,fi}} . \quad (5)$$

Pri tem je k_T redukcijski faktor trdnosti, ki je odvisen od temperature materiala, X_k je karakteristična vrednost trdnosti oziroma deformacijske lastnosti za projektiranje pri običajni temperaturi, $\gamma_{M,fi}$ pa je delni varnostni faktor za ustrezno lastnost materiala v požarnem projektnem stanju. Vrednost faktorja $\gamma_{M,fi}$ za mehanske lastnosti betona, jekla za armiranje in jekla za prednapenjanje je podana v SIST EN 1992-1-2:2005 in je enaka 1.0.

2.3.2 Toplotne lastnosti materiala

Projektne vrednosti toplotnih lastnosti materiala $X_{d,fi}$ določimo na naslednji način:

$$X_{d,fi} = \frac{X_{k,T}}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{za ugoden vpliv povečanja lastnosti na varnost oziroma} \quad (6a)$$

$$X_{d,fi} = \gamma_{M,fi} \cdot X_{k,T} \quad \text{za neugoden vpliv povečanja lastnosti na varnost.} \quad (6b)$$

$X_{k,T}$ predstavlja vrednost toplotne lastnosti materiala v požarnem projektnem stanju, $\gamma_{M,fi}$ pa delni varnostni faktor za ustrezno lastnost materiala v požarnem projektnem stanju. Vrednost faktorja $\gamma_{M,fi}$ za toplotne lastnosti betona, jekla za armiranje in jekla za prednapenjanje je prav tako podana v SIST EN 1992-1-2:2005 in je enaka 1.0.

2.4 Postopki projektiranja požarnovarnih konstrukcij

Za zadovoljitev zahteve (1) so v standardu SIST EN 1992-1-2:2005 dovoljene naslednje metode projektiranja:

- **detajliranje** v skladu s priznanimi projektnimi rešitvami (v tabelah so za zahtevano požarno odpornost AB elementov navedene minimalne potrebne dimenzije prečnega prereza in minimalne dimenzije zaščitne plasti betona),
- **poenostavljene računske metode** za določene vrste konstrukcijskih elementov in
- **napredne računske metode** za simulacijo obnašanja konstrukcijskih elementov, delov konstrukcij ali celotnih konstrukcij v času požara.

V nadaljevanju diplomske naloge podrobneje obravnavamo poenostavljene računske metode. Osredotočimo se na projektiranje AB nosilcev.

3 POENOSTAVLJENE RAČUNSKE METODE POŽARNOVARNEGA PROJEKTIRANJA AB NOSILCEV

3.1 Splošno

Poenostavljene računske metode so namenjene približni oceni požarne odpornosti enostavnih konstrukcijskih elementov gradbenih konstrukcij, kot so na primer stebri in nosilci. Skladno s standardom SIST EN 1992-1-2:2005 določimo mejno nosilnost karakterističnega prečnega prereza obravnavanega nosilca pri povišani temperaturi in jo primerjamo z učinki ustrezne kombinacije vplivov.

V splošnem požarno analizo razdelimo v dva matematično nepovezana dela:

- **temperaturna analiza:** določiti moramo časovno razporeditev temperatur v obravnavanem nosilcu med požarom (ta del je načeloma enak za poenostavljene in napredne metode projektiranja) in
- **mehanska analiza:** določimo mejno nosilnost obravnavanega nosilca ter s preverjanjem zahteve (1) ugotavljamo varnost nosilca v požarnem projektnem stanju.

Pri analizi konstrukcije v pogojih požara pa moramo določiti tudi požarni scenarij, na osnovi katerega bomo izvedli požarno analizo.

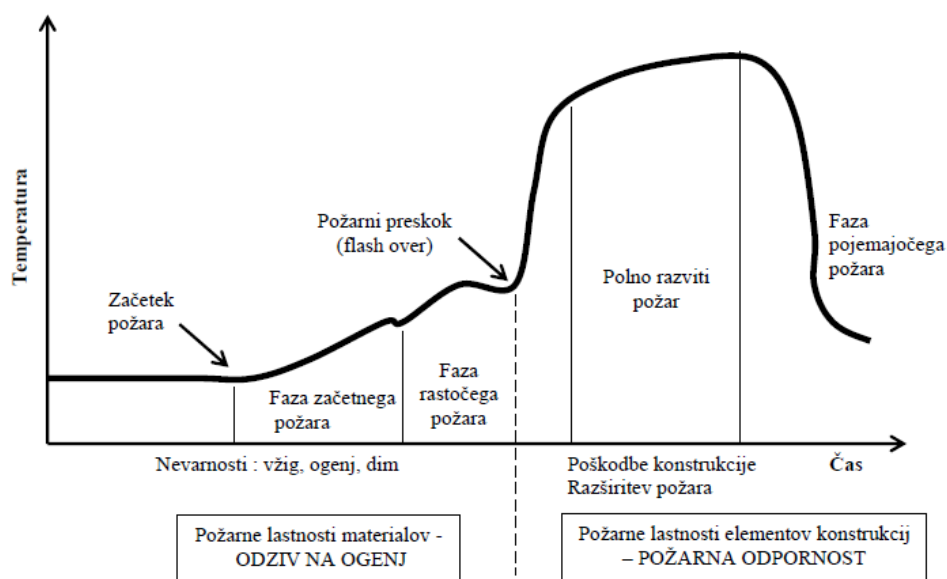
V standardu SIST EN 1992-1-2:2005 so podane tri poenostavljene računske metode in sicer:

- metoda izoterme 500°C,
- metoda območij in
- metoda na podlagi določitve ukrivljenosti elementa.

V diplomski nalogi bomo podrobneje predstavili le metodi, ki temeljita na zmanjšanju prečnega prereza elementa: to sta metoda izoterme 500°C in metoda območij. Metoda na podlagi ocene ukrivljenosti elementa je namenjena predvsem analizi požarne odpornosti stebrov, zato jo v diplomski nalogi ne obravnavamo.

3.2 Požarni scenarij

Požarni scenarij je kvalitativen opis poteka požara s časovno opredeljenimi ključnimi dogodki, ki označujejo požar in ga razlikujejo od drugih možnih požarov. Definira proces vžiga, fazo začetnega in rastočega požara, fazo polno razvitega požara ter fazo pojemajočega požara (glej sliko 2). Pri tem upošteva lastnosti ambienta in sistema zgradbe.

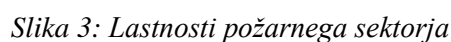


Slika 2: Požarna krivulja naravnega požara

Pri analizi požarne odpornosti konstrukcije oziroma njenega dela uporabljamo določen časovno temperaturni in prostorski razvoj požara, t.i. projektni požar. Evrokod standard podaja standardizirane načine segrevanja požarnega prostora v obliki t.i. **požarnih krivulj**. Te podajajo spreminjanje temperature plinov v okolici površine elementa kot funkcijo časa. Ločimo:

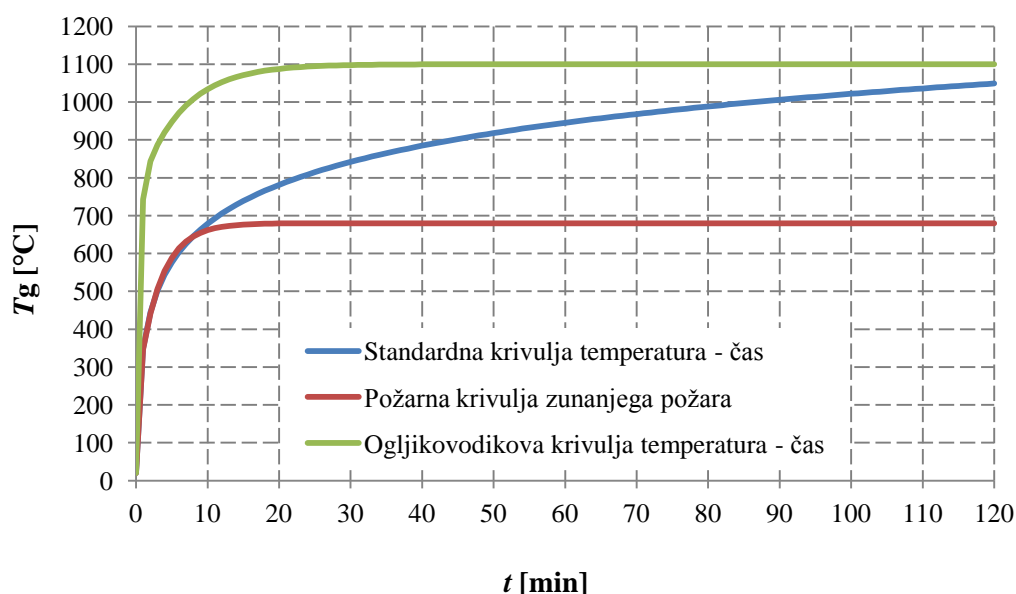
- **nominalne (nazivne) požarne krivulje** so konvencionalne krivulje, prilagojene razvrščanju ali ugotavljanju (potrjevanju) požarne odpornosti (npr. standardna krivulja temperatura-čas, požarna krivulja zunanjega požara in požarna krivulja ogljikovodikov). Z njimi izvedemo temperaturno analizo konstrukcijskih elementov za določeno časovno obdobje, brez faze ohlajanja.
- **modelirane požarne krivulje** so določene na osnovi požarnih modelov in specifičnih fizikalnih parametrov, ki določajo pogoje v požarnem sektorju. S požarnim modelom temperaturno analizo konstrukcijskih elementov izvedemo za celotno trajanje požara, vključno z fazo ohlajanja.

Pred podrobnejšim opisom značilnih požarnih krivulj za stavbe definirajmo še pojem **požarni sektor**. To je prostor znotraj zgradbe, ki sega skozi eno ali več nadstropij (maksimalno tri etaže) in je ograjen z ločilnimi elementi, ki med obravnavanim požarom preprečujejo širitev požara izven sektorja (glej sliko 3). Praviloma morajo biti požarno ločeni vsaka etaža, zaščitena stopnišča in zaščiteni hodniki, vertikalne povezave (jaški, dvigala,...) ter deli stavb z različnimi namembnostmi. Velikost požarnih sektorjev je odvisna od namembnosti stavbe ali prostorov v njej. Določitev potrebnih požarnih lastnosti nosilnih gradbenih elementov je odvisna od števila etaž, specifične požarne obremenitve, namembnosti oziroma nevarnosti za požar, velikosti stavb in vgrajenega sistema za avtomatsko gašenje.



kjer je T_g temperatura plinov v požarnem sektorju v $^{\circ}\text{C}$, t pa čas v minutah.

Nominalne (nazivne) požarne krivulje prikazujemo na sliki 4.



Slika 4: Nominalne (nazivne) požarne krivulje v skladu s standardom SIST EN 1991-1-2:2004

3.2.2 Modelirane požarne krivulje

3.2.2.1 Poenostavljeni požarni modeli: parametrična krivulja temperatura – čas

Poenostavljeni požarni modeli temeljijo na posebnih fizikalnih parametrih z omejeno možnostjo uporabe. Takšen poenostavljen model je parametrična krivulja. Temperaturo plinov v sektorju določimo na podlagi naslednjih parametrov: gostote požarnih obremenitev, pogojih prezračevanja, površini sektorja, toplotne lastnosti materiala oboda, hitrosti razvoja požara in drugih.

Veljavna je za požarne sektorje s talno površino do 500 m², brez odprtín v stropu in z maksimalno višino sektorja 4 m. Predpostavljeno je, da požarna obremenitev sektorja v celoti zgori. Krivulja temperatura – čas je v fazi segrevanja podana z enačbo:

$$T_g = 20 + 1325 \cdot \left(1 - 0.324 \cdot e^{-0.2t^*} - 0.204 \cdot e^{-1.7t^*} - 0.472 \cdot e^{-19t^*} \right), \quad (10)$$

$$t^* = t \cdot \Gamma. \quad (11)$$

Pri tem je T_g temperatura plinov v požarnem sektorju v °C, t je čas v urah, Γ pa je brezdimenzijski parameter, ki ga izračunamo z enačbo:

$$\Gamma = [O / b]^2 / (0.04 / 1160)^2. \quad (12)$$

O je faktor odprtosti v $m^{1/2}$, b pa je toplotna absorptivnost oboda v $J/m^2 s^{1/2} K$. V primeru, da je $\Gamma = 1$, se enačba (10) približa standardni krivulji temperatura – čas. Faktorja O in b izračunamo z enačbama:

$$O = A_v \cdot \frac{\sqrt{h_{eq}}}{A_t} \quad \text{z naslednjimi omejitvami: } 0.02 \leq O \leq 0.20 \text{ in} \quad (13)$$

$$b = \sqrt{(\rho \cdot c \cdot \lambda)} \quad \text{z naslednjimi omejitvami: } 100 \leq b \leq 2200. \quad (14)$$

V enačbah (13) in (14) je A_v celotna površina vertikalnih odprtosti v vseh stenah v m^2 , h_{eq} je uteženo povprečje višin oken v vseh stenah v m, A_t je celotna površina oboda (stene, stropovi in tla, vključno z odprtostmi) v m^2 , ρ je gostota ločilnega oboda v kg/m^3 , c je specifična toplota ločilnega oboda v J/kgK , λ pa je toplotna prevodnost ločilnega oboda v W/mK .

V primeru, da je obod sestavljen iz različnih plasti materialov, moramo toplotno absorptivnost b izračunati za vsako plast materiala posebej. Pri tem moramo upoštevati naslednja pogoja:

- če je $b_1 < b_2$, potem je $b = b_1$,
- če je $b_1 > b_2$, potem mejno debelino s za izpostavljeni material določimo z enačbo:

$$s_{lim} = \sqrt{\frac{3600 \cdot t_{max} \cdot \lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1}}. \quad (15)$$

Pri tem t_{max} izračunamo z enačbo (20).

Debelino posamezne plasti primerjamo z mejno debelino in pri tem upoštevamo:

- če je $s_1 < s_{lim}$, potem je $b = b_1$
- če je $s_1 > s_{lim}$, potem faktor b določimo z enačbo:

$$b = \frac{s_1}{s_{lim}} \cdot b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{lim}}\right) \cdot b_2. \quad (16)$$

Pri tem indeks 1 predstavlja plast, neposredno izpostavljeno požaru, indeks 2 naslednjo plast in tako naprej. s_i je debelina i -te plasti, b_i je toplotna absorptivnost i -te plasti, ki jo izračunamo z enačbo:

$$b_i = \sqrt{(\rho_i \cdot c_i \cdot \lambda_i)}. \quad (17)$$

kjer je ρ_i je gostota, c_i specifična toplota in λ_i toplotna prevodnost i -te plasti oboda.

Prav tako lahko v računu upoštevamo različne toplotne absorptivnosti sten, stropov in tal. Povprečno vrednost absorptivnosti izračunamo z enačbo:

$$b = \frac{(\sum(b_j \cdot A_j))}{(A_t - A_v)}, \quad (18)$$

kjer je A_j površina j -te ploskve (odprtini ne upoštevamo), b_j pa je toplotna absorptivnost j -te ploskve oboda skladno z enačbama (15) in (16).

Pri izračunu faktorja b lahko za gostoto ρ , specifično toploto c in toplotno prevodnost λ oboda upoštevamo vrednosti pri normalnih temperaturah.

V fazi segrevanja nastopi maksimalna temperatura T_{\max} pri času $t^* = t_{\max}^*$, ki ga zapišemo z enačbo:

$$t_{\max}^* = t_{\max} \cdot \Gamma \quad \text{in} \quad (19)$$

$$t_{\max} = \max \left\{ \frac{0.2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}}{O}, t_{\lim} \right\}. \quad (20)$$

V primerih požarov s kontroliranim izgorevanjem je čas t_{\max} , podan s t_{\lim} . Če je t_{\lim} podan z $\left(\frac{0.2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}}{O} \right)$, je požar ventilacijsko kontroliran.

t_{\lim} je čas v urah in je odvisen od hitrosti razvoja požara:

- $t_{\lim} = 25$ min za primer počasi razvijajočega požara,
- $t_{\lim} = 20$ min za primer srednje hitrosti razvoja požara in
- $t_{\lim} = 15$ min za primer hitrega razvoja požara.

Kadar velja, da je $t_{\max} = t_{\lim}$, t^* v enačbi (10) nadomestimo z:

$$t^* = t \cdot \Gamma_{\lim}. \quad (21)$$

Pri tem velja:

$$\Gamma_{\lim} = \left[\frac{O_{\lim}}{b} \right]^2 / \left(\frac{0.04}{1160} \right)^2 \quad \text{in} \quad (22)$$

$$O_{\lim} = \frac{0.1 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}}{t_{\lim}}. \quad (23)$$

Če je $O > 0.04$ in $q_{t,d} > 1160$, potem moramo Γ_{\lim} v enačbi (22) pomnožiti s faktorjem k , ki je:

$$k = 1 + \left(\frac{O - 0.04}{0.04} \right) \cdot \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \cdot \left(\frac{1160 - b}{1160} \right). \quad (24)$$

V enačbi (23) in (24) je $q_{t,d}$ projektna vrednost gostote požarne obremenitve v MJ/m^2 glede na skupno površino oboda A_t . Velja zveza:

$$q_{t,d} = \frac{q_{f,d} \cdot A_f}{A_t}, \quad \text{z naslednjo omejitvijo: } 50 \leq q_{t,d} \leq 1000. \quad (25)$$

V enačbi (25) je $q_{f,d}$ projektna vrednost gostote požarne obremenitve v MJ/m² glede na skupno površino tal sektorja A_f , ki jo izračunamo z enačbo:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n. \quad (26)$$

Pri tem je $q_{f,k}$ karakteristična gostota požarne obtežbe v MJ/m² (preglednica 1), m je izgorevalni faktor in za pretežno celulozne materiale lahko predpostavimo $m = 0.8$, δ_{q1} je faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na velikost sektorja (preglednica 2), δ_{q2} je faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na rabo oziroma naselitev (za pisarne, stanovanja, hotele in papirno industrijo je $\delta_{q2}=1.0$), δ_n je faktor, ki upošteva uporabo različnih aktivnih ukrepov gašenja (pršilci, detektorji, avtomatski prenos alarma, gasilci,...) (preglednica 3).

Preglednica 1: Karakteristična gostota požarne obtežbe $q_{f,k}$ v MJ/m²

Raba	Povprečje	80% kvantil
Stanovanja	780	948
Bolnišnice (sobe)	230	280
Hoteli (sobe)	310	377
Knjižnice	1500	1824
Pisarne	420	511
Šolski razredi	285	347
Nakupovalna središča	600	730
Dvorane (kino)	300	365
Transport (javni prostori)	100	122

Preglednica 2: Faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na velikost sektorja δ_{q1}

Talna površina sektorja [m²]	δ_{q1}
25	1.10
250	1.50
2500	1.90
5000	2.00
1000	2.13

Preglednica 3: Faktor, ki upošteva uporabo različnih aktivnih ukrepov gašenja δ_{ni}

δ_{ni} funkcija aktivnih ukrepov za preprečevanje požara										
Avtomatsko preprečevanje požara				Avtomatsko zaznavanje požara		Ročno preprečevanje požara				
Avtomatski vodni gasilni sistem	Neodvisna preskrba z vodo			Avtomatsko zaznavanje požara in alarm	Avtomatska povezava alarma z gasilsko enoto	Lastna gasilska enota	Zunanja gasilska enota	Varne intervencijske poti	Gasilski pripomočki	Sistem za odvod dima
	0	1	2							
	δ_{n1}	δ_{n2}								
0.61	1.0	0,87	0.7	0.87 ali 0.73	0.87	0.61 ali 0.78		0.9 ali 1.0 ali 1.5	1.0 ali 1.5	1.0 ali 1.5

Krivulja temperatura – čas za fazo ohlajanja je podana z enačbo:

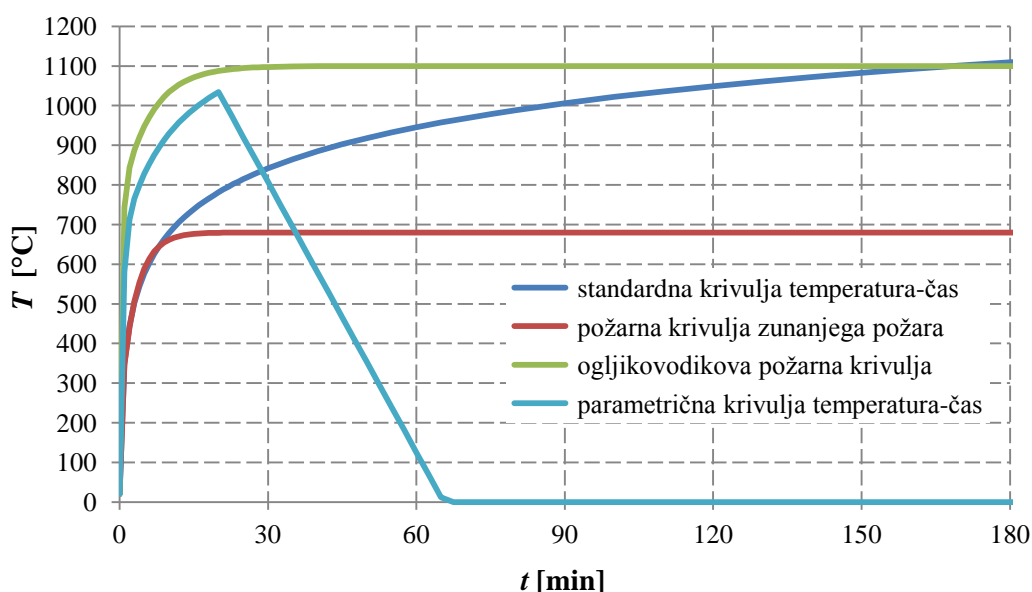
$$T_g = \begin{cases} T_{\max} - 625 \cdot (t^* - t_{\max}^* \cdot x) & \text{za } t_{\max}^* \leq 0.5, \\ T_{\max} - 250 \cdot (3 - t_{\max}^*) \cdot (t^* - t_{\max}^* \cdot x) & \text{za } 0.5 \leq t_{\max}^* \leq 2, \\ T_{\max} - 250 \cdot (t^* - t_{\max}^* \cdot x) & \text{za } t_{\max}^* \geq 2. \end{cases} \quad (27)$$

Pri tem je:

$$t_{\max}^* = \left(\frac{0.2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}}{O} \right) \cdot \Gamma \text{ in} \quad (28)$$

$$x = \begin{cases} 1 & \text{za } t_{\max} > t_{\lim} , \\ \frac{t_{\lim} \cdot \Gamma_{\lim}}{t_{\max}^*} & \text{za } t_{\max} = t_{\lim} . \end{cases} \quad (29)$$

Na sliki 5 prikazujemo parametrično krivuljo ter jo primerjamo z nominalnimi požarnimi krivuljami.



Slika 5: Parametrična krivulja v primerjavi z nominalnimi (nazivnimi) požarnimi krivuljami

3.2.2.2 Natančnejši požarni modeli

Poznamo tudi natančnejše požarne modele, ki temeljijo na osnovi ohranjanja mase in energije.

3.2.2.3 Enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru

Z nazivno krivuljo temperatura-čas izvedemo temperaturno analizo konstrukcijskega elementa za določeno časovno obdobje, brez faze ohlajanja. Podobno analizo lahko izvedemo tudi pri uporabi požarnih modelov, le da moramo v tem primeru določiti enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru, to pomeni čas izpostavljenosti pri standardni krivulji temperatura-čas, ki naj bi imel enak toplotni učinek kot pri dejanskem požaru v sektorju.

Ta postopek lahko uporabimo, kadar projektiranje elementov temelji na tabeliranih podatkih ali drugih poenostavljenih postopkih v povezavi s standardno izpostavljenostjo požaru. Opisana metoda ni uporabna za sovprežne in lesene konstrukcije. Enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru izračunamo z enačbo:

$$t_{e,d} = (q_{f,d} \cdot k_b \cdot w_f) \cdot k_c, \quad (30)$$

kjer je k_b faktor pretvorbe skladno s preglednico 4, w_f je faktor prezračevanja, k_c pa je korekcijski faktor za material nosilnega prečnega prereza (za armirani beton je $k_c = 1.0$).

Preglednica 4: Faktor pretvorbe k_b v odvisnosti od toplotnih lastnosti materiala oboda

$b = \sqrt{(\rho \cdot c \cdot \lambda)}$ [J/m ² s ^{1/2} K]	k_b [min·m ² /MJ]
$b > 2500$	0.04
$720 \leq b \leq 2500$	0.055
$b < 720$	0.07

Faktor prezračevanja w_f izračunamo z enačbo:

$$w_f = \left(\frac{6.0}{H}\right)^{0.3} \cdot \left[\frac{0.62 + 90 \cdot (0.4 - \alpha_v)^4}{(1 + b_v \cdot \alpha_h)}\right] \geq 0.5, \quad (31)$$

kjer je H višina požarnega sektorja v m. Parametre α_v , α_h in b_v izračunamo z enačbami:

$$\alpha_v = \frac{A_v}{A_f}, \quad \text{z omejitvijo } 0.025 \leq \alpha_v \leq 0.25, \quad (32)$$

$$\alpha_h = \frac{A_h}{A_f} \quad \text{in} \quad (33)$$

$$b_v = 12.5 \cdot (1 + 10 \cdot \alpha_v - \alpha_v^2) \geq 10.0 \quad (34)$$

Pri tem je A_v ploščina navpičnih odprtín v fasadi v m², A_f je ploščina tal sektorja v m², A_h pa je ploščina vodoravnih odprtín v strehi v m².

Za majhne požarne sektorje brez odprtín v strehi [$A_f < 100 \text{ m}^2$] lahko faktor prezračevanja w_f izračunamo z enačbo:

$$w_f = \frac{O^{-1/2} \cdot A_f}{A_t}. \quad (35)$$

Ko dokazujemo požarno varnost konstrukcijskega elementa je v enačbi (2) zahtevan čas požarne odpornosti $t_{fi,requ}$ kar enak enakovrednemu čas izpostavljenosti standardnemu požaru ali pa je zahtevano časovno obdobje podano v nacionalnih predpisih.

3.3 Temperaturna analiza

3.3.1. Splošno

S temperaturno analizo določimo razvoj temperature v nosilcu glede na merodajni toplotni vpliv ter ob upoštevanju temperaturno odvisnih toplotnih in mehanskih lastnosti materialov.

Pri temperaturni analizi AB nosilca predpostavimo:

- Temperatura celotnega požarnega prostora ali vsaj dela na območju vzdolž nosilca je enakomerna. Zato lahko analiziramo časovno razporeditev temperatur med požarom le v prečnem prerezu nosilca.
- Vpliv vlage na časovno spreminjanje temperatur med požarom zanemarimo oziroma ga upoštevamo s povečanjem specifične toplote v temperaturnem območju med 100 in 200°C, s katerim posredno upoštevamo vpliv izparevanja vode na razvoj temperatur v betonu. To lahko storimo, ker je vsebnost vlage v običajnih AB konstrukcijah relativno nizka (nižja od 3-4% teže betona).
- Pri običajni stopnji armiranja (do 4% površine prečnega prereza) lahko vpliv armature na časovno spreminjanje temperature prečnega prereza zanemarimo. Pri analizi rezultatov privzamemo, da so temperature v posamezni armaturni palici enake temperaturam betona na mestu armaturne palice.

Upoštevati moramo, da se med požarom toplota prenaša na tri načine:

- s **sevanjem oziroma radiacijo**, kjer se energija prenaša z elektromagnetnim valovanjem,
- s **konvekcijo**, kjer se energija prenaša z gibanjem snovi z različnimi temperaturami in
- s **prevajanjem oziroma kondukcijo**, kjer energija potuje v obliki toplote skozi snovi z mest z višjo temperaturo na mesta z nižjo temperaturo.

3.3.2. Prevajanje toplote po trdni snovi

Pri običajnih gradbenih konstrukcijah (betonskih, jeklenih ali lesenih) se med požarom največ toplote prenaša s **kondukcijo**. To opišemo s parcialno diferencialno enačbo za prevajanja toplote:

$$V: \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q - \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (37)$$

V enačbi (37) je T temperatura posamezne točke elementa konstrukcije pri času t , λ_{ij} so komponente prevodnostnega tenzorja snovi (za izotropen in homogen material je $\lambda_{ij} = \lambda$), Q je specifični prostorninski toplotni tok, ρ je gostota snovi, c pa je specifična toplota snovi.

Prehod toplote skozi zunanje površine konstrukcijskega elementa zaradi konvekcije in radiacije v požarnem prostoru pa upoštevamo z ustreznimi robnimi pogoji. Ti so:

$$S_T : T_s - T_m = 0 , \quad (38)$$

$$S_q : \lambda_{ij} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \cdot n_i - q_s = 0 , \quad (39)$$

$$V : T(x_i, 0) = T_0(x_i) . \quad (40)$$

Pri tem je S_t mejna ploskev, na kateri je s temperaturnim režimom okolja predpisano spreminjanje temperature T_s , S_q je mejna ploskev elementa, na kateri je predpisan specifični površinski toplotni pretok q_s , n_i so komponente enotskega vektorja normale na mejno ploskev elementa, V označuje območje prostora, ki ga zavzema obravnavan element, T_0 pa je začetna temperatura v poljubni točki obravnavanega območja.

Specifični površinski toplotni pretok oziroma neto toplotni tok q_s določimo z upoštevanjem prenosa toplote s konvekcijo in radiacijo:

$$q_s = q_c + q_r . \quad (41)$$

Konvekcijski del neto toplotnega toka je sorazmeren temperaturni razliki okolice in površine in ga izračunamo z enačbo:

$$q_c = \alpha_c \cdot (T_g - T_m) , \quad (42)$$

kjer je α_c je prestopni koeficient v W/m^2K in je odvisen od požarne krivulje. Odvisnost prikazujemo v preglednici 4.

*Preglednica 5: Odvisnost prestopnega koeficienta α_c od požarne krivulje skladno s
SIST EN 1991-1-2:2004*

Krivulja temperatura – čas	α_c [W/(m ² K)]
Standardna	25
Krivulja zunanjega požara	25
Ogljikovodikova	50
Modeli naravnih požarov	35

Radiacijski del neto toplotnega toka pa izračunamo z enačbo:

$$q_r = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot B \cdot [(T_r + 273)^4 - (T_m + 273)^4] , \quad (43)$$

kjer je Φ faktor oblike, ε_m je emisivnost površine elementa, ε_f je emisivnost plamenskega telesa, B je Stefan-Boltzmanova konstanta $B = 5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$, T_r je efektivna temperatura sevanja v °C, T_m

pa je površinska temperatura elementa v °C. Za emisivnost betonskih površin upoštevamo $\varepsilon_m = 0.7$, za emisivnost plamenskega telesa pa $\varepsilon_f = 1.0$.

Analitično rešitev osnovne enačbe nestacionarnega prevajanja toplote s pripadajočimi robnimi in začetnimi pogoji (enačbe (37) do (40)) poznamo le za najenostavnejše enodimenzionalne ali dvodimenzionalne probleme. V splošnem pa sistem rešimo z metodo končnih elementov.

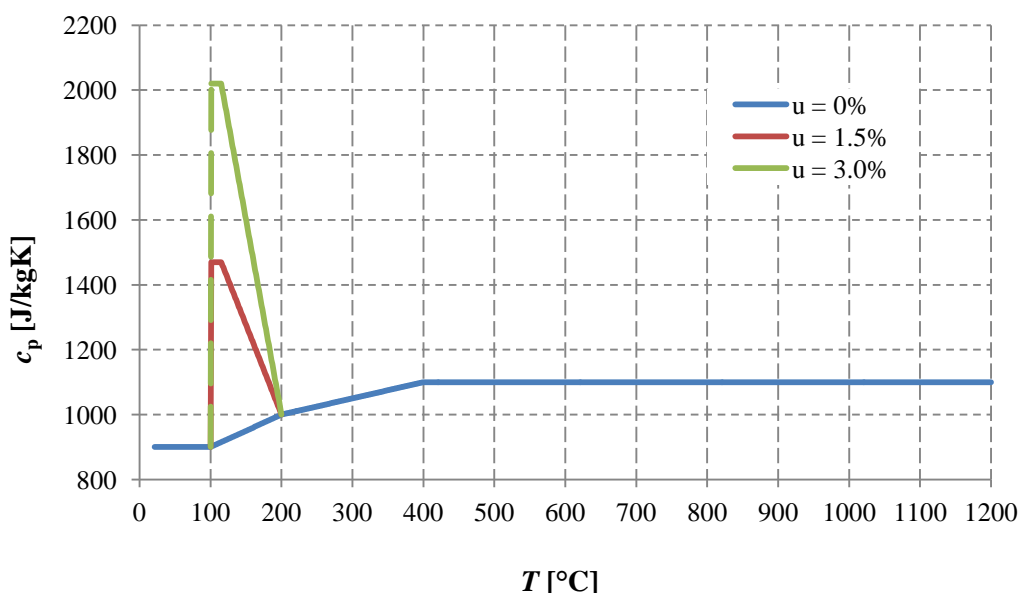
3.3.3 Toplotne in mehanske lastnosti betona pri povišanih temperaturah

V temperaturni analizi moramo med drugim upoštevati tudi temperaturno odvisne toplotne in mehanske lastnosti betona. V nadaljevanju prikazujemo temperaturno odvisnost specifične toplote, gostote in toplotne prevodnosti betona.

3.3.3.1 Specifična toplota betona

Specifična toplota betona je odvisna od temperature in vlage betona. S povečanjem specifične toplote v temperaturnem območju med 100 in 200 °C posredno upoštevamo vpliv izparevanja vode na razvoj temperatur v betonu. Takšna poenostavitev je upravičena, saj je kemijsko - temperaturno-vlažnostna analiza prezahtevna za vsakdanjo inženirsko prakso in zato vpliv transporta tekočin in kemičnih procesov na časovno razporeditev temperatur konstrukcij med požarom upoštevamo le posredno.

Temperaturno odvisnost specifične toplote c_p betona iz kremenastega in apnenčastega agregata pri vlažnosti $u = 0 \%$, $u = 1.5 \%$ in $u = 3.0 \%$ teže betona prikazujemo na sliki 6.

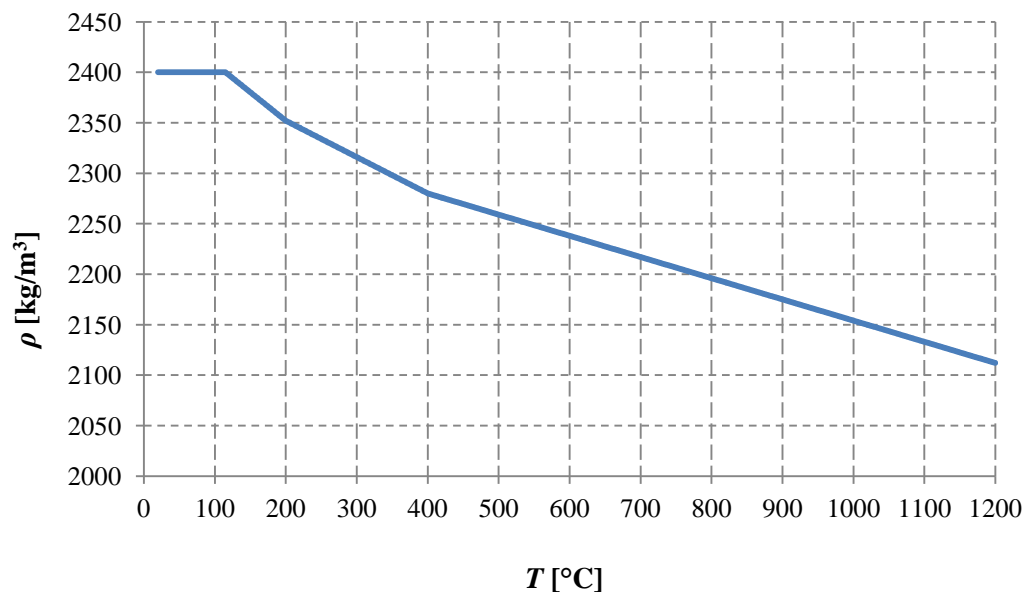


Slika 6 : Specifična toplota betona v skladu s standardom SIST EN 1992-1-2:2005

3.3.3.2 Gostota betona

Gostota betona se z naraščanjem temperature zmanjšuje, kar je posledica izparevanja vode. Predpostavimo, da je gostota betona pri temperaturi 20°C $\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$.

Temperaturno odvisnost gostote betona ρ_c prikazujemo na sliki 7.



Slika 7: Gostota betona v skladu s standardom SIST EN 1992-1-2:2005

3.3.3.3 Toplotna prevodnost betona

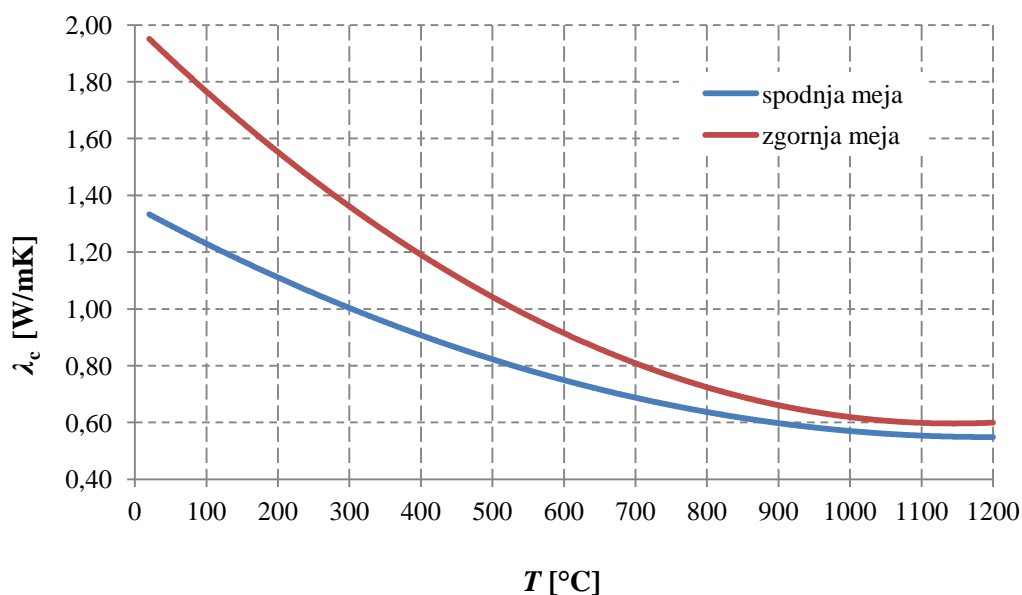
Tudi toplotna prevodnost betona se z naraščanjem temperature zmanjšuje. V standardu SIST EN 1992-1-2:2005 je določena zgornja in spodnja mejna vrednost in sicer z naslednjima enačbama:

$$\text{zgornja meja: } \lambda_c = 2 - 0.2451 \cdot \left(\frac{T}{100}\right) + 0.0107 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^2, \quad (44)$$

$$\text{spodnja meja: } \lambda_c = 1.36 - 0.136 \cdot \left(\frac{T}{100}\right) + 0.0057 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^2. \quad (45)$$

Podani mejni vrednosti veljata za beton z normalno težo. Spodnja meja toplotne prevodnosti daje za betonske konstrukcije bolj realistične temperature kot zgornja meja.

Temperaturno odvisnost toplotne prevodnosti betona λ_c prikazujemo na sliki 8.



Slika 8: Toplotna prevodnost betona v skladu s standardom SIST EN 1992-1-2:2005

3.4 Mehanska analiza

Mehanska analiza predstavlja drugi del požarne analize. V tem delu analize ocenimo požarno odpornost nosilca. Skladno s standardom SIST EN 1992-1-2:2005 uporabimo naslednji poenostavljeni računski metodi:

- metodo izoterme 500°C oziroma
- metodo območij.

S poenostavljenima metodama ocenimo mejno osno-upogibno odpornost karakterističnega prečnega prereza nosilca pri povišani temperaturi in jo primerjamo z učinki ustrezne kombinacije vplivov. Obe metodi sta uporabni za konstrukcijske elemente, ki so izpostavljeni standardnemu požaru. Metodo izoterme 500°C lahko uporabljamo tudi v povezavi s parametričnimi požarnimi krivuljami.

V nadaljevanju podrobneje predstavimo obe metodi.

3.4.1 Metoda izoterme 500°C

3.4.1.1 Načela in področja uporabe

Metoda je primerna za analizo osno-upogibne odpornosti armiranih in prednapetih betonskih prečnih prereзов, ki so izpostavljeni standardnemu požaru oziroma parametričnemu požaru s faktorjem odprtín $O \geq 0.14 \text{ m}^{1/2}$. Pri tem mora prečni prerez izpolnjevati zahteve iz preglednice 6 oziroma 7.

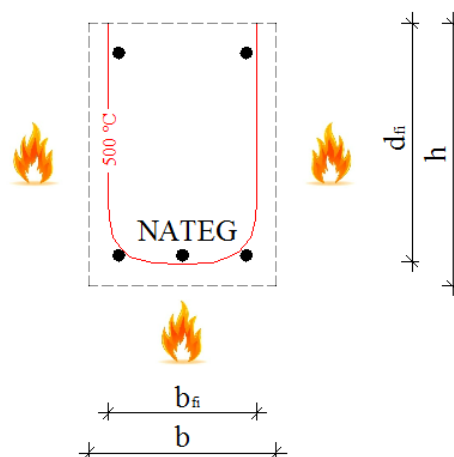
Preglednica 6: Najmanjša širina prečnega prereza v odvisnosti od požarne odpornosti (za izpostavljenost standardnemu požaru)

Požarna odpornost	R 60	R 90	R 120	R180	R240
Najmanjša debelina prečnega prereza [mm]	90	120	160	200	280

Preglednica 7: Najmanjša širina prečnega prereza v odvisnosti od gostote požarne obtežbe (za izpostavljenost parametričnemu požaru)

Gostota požarne obtežbe [MJ/m ²]	200	300	400	600	800
Najmanjša debelina prečnega prereza [mm]	100	140	160	200	240

Metoda temelji na predpostavki, da poškodovani del betona, t.j. del betonskega prečnega prereza s temperaturo višjo od 500°C, pri računu nosilnosti zanemarimo. Preostali del betona, t.j. del prečnega prereza s temperaturo pod 500°C, pa ohrani začetne mehanske lastnosti. K požarni odpornosti prečnega prereza upoštevamo tudi prispevek vzdolžne armature. Trdnost posamezne palice reduciramo z redukcijskim faktorjem v odvisnosti od temperature v armaturi. Na sliki 9 prikazujemo geometrijske karakteristike upogibno obremenjenega AB pravokotnega prečnega prereza dimenzij b/h med požarom. Nosilec je izpostavljen požaru s treh strani. Z d_{fi} označujemo statično višino prereza, b_{fi} pa je reducirana širina tlačno obremenjenega dela prečnega prereza v požarnem projektnem stanju. Prikazan je tudi potek izoterme 500°C.



Slika 9: Izoterma 500°C pri upogibno obremenjenem AB prerezu, izpostavljenemu požaru s treh strani

3.4.1.2 Ocena požarne odpornosti osno-upogibno obremenjenega AB prečnega prereza

Računski postopek za oceno požarne odpornosti AB prečnega prereza je sledeč:

- s pomočjo temperaturnega profila za določen čas trajanja požara določimo potek izoterme 500°C,
- izključimo beton izven izoterme 500°C in določimo reducirane dimenzije učinkovitega prečnega prereza – širino tlačne cone b_{fi} in statično višino d_{fi} ,

- s pomočjo temperaturnega profila ocenimo temperature v vzdolžnih armaturnih palicah. Nekatere palice lahko ležijo tudi izven zmanjšanega prečnega prereza, a jih kljub temu upoštevamo,
- v odvisnosti od temperature reduciramo trdnost vzdolžnih armaturnih palic,
- izračunamo osno-upogibno odpornost prečnega prereza ob upoštevanju zmanjšanega prečnega prereza in reduciranih trdnosti armaturnih palic,
- preverimo pogoj (1): $E_{d,t,fi} \leq R_{d,t,fi}$.

Opisani postopek predstavimo še z enačbami. Obravnavamo prečni prerez AB nosilca, ki je v požarnem projektnem stanju obremenjen z osno silo $N_{Ed,t,fi}$ in upogibnim momentom $M_{Ed,t,fi}$. S pomočjo ravnotežja osnih sil v prečnem prerezu izračunamo lego nevtralne osi x . Ravnotežje osnih sil v prerezu zapišemo z izrazom:

$$N_s - N_s' - N_c - N_{Ed,t,fi} = 0, \quad (46)$$

kjer sta N_s in N_s' osni sili v natezni oziroma tlačni armaturi, N_c pa je rezultanta tlačnih napetosti v betonskem delu prečnega prereza. Ob upoštevanju konstantnega poteka tlačnih napetosti v betonskem delu prečnega prereza velja:

$$N_c = 0.8 \cdot x \cdot b_{fi} \cdot f_{cd}, \quad (47)$$

kjer je f_{cd} projektna tlačna trdnost betona pri sobni temperaturi. Oddaljenost nevtralne osi od zgornjega roba prereza izračunamo z enačbo:

$$x = \frac{N_s - N_s' - N_{Ed,t,fi}}{0.8 \cdot b_{fi} \cdot f_{cd}}. \quad (48)$$

Nosilnost spodnje (natezne) oziroma zgornje (tlačne) armature pa izračunamo s pomočjo enačb:

$$N_s = \sum_i A_{s,i} \cdot f_{sd,fi,i}, \quad (49)$$

$$N_s' = \sum_j A_{s,j}' \cdot f_{sd,fi,j}'. \quad (50)$$

Pri tem sta $A_{s,i}$ in $A_{s,j}'$ površini prečnega prereza spodnje oziroma zgornje armature v cm^2 , $f_{sd,fi,i}$ in $f_{sd,fi,j}'$ pa sta projektni trdnosti i -te spodnje oziroma j -te zgornje vzdolžne armaturne palice med požarom. Izračunamo ju z izrazoma:

$$f_{sd,fi,i} = k_{s,T,i} \cdot \frac{f_{yk,i}}{\gamma_{s,fi}}, \quad (51)$$

$$f_{sd,fi,j}' = k_{s,T,j} \cdot \frac{f_{yk,j}}{\gamma_{s,fj}}, \quad (52)$$

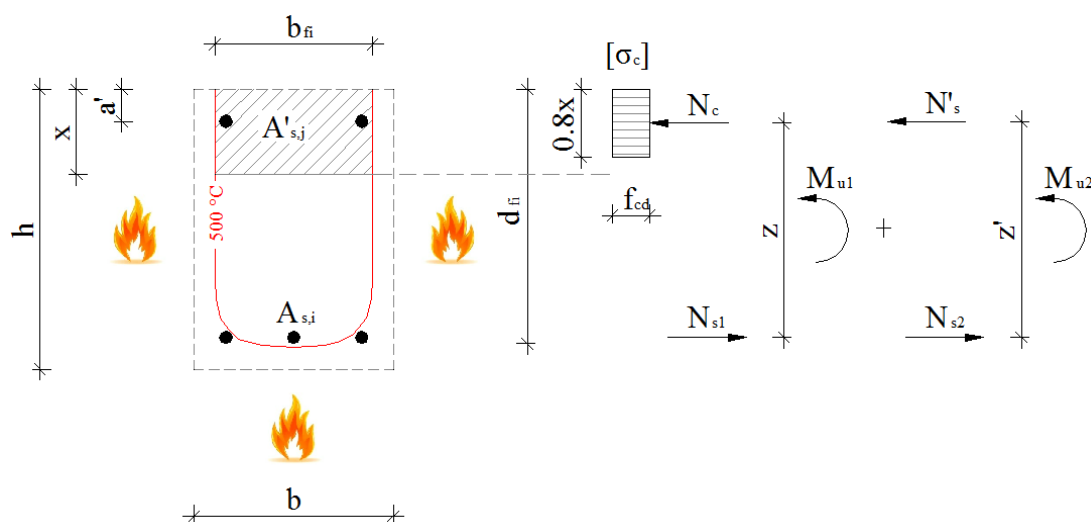
kjer sta $k_{s,T,i}$ in $k_{s,T,j}$ temperaturno odvisna redukcijska faktorja trdnosti jekla za posamezno spodnjo oziroma zgornjo armaturno palico.

Upogibno odpornost prečnega prereza v požarnem projektnej stanju razdelimo na moment M_{u1} , ki ga prevzame enojno armiran prerez in na moment M_{u2} , ki ga prevzame zgornja (tlačna) armatura skupaj z delom natezne armature. Prispevka izračunamo z enačbo:

$$M_{500} = M_{u1} + M_{u2} = N_c \cdot z + N'_s \cdot z' = N_c \cdot (d_{fi} - 0.4 \cdot x) + N'_s \cdot (d_{fi} - a'), \quad (53)$$

kjer je z ročica notranjih sil (razdalja med rezultanto nateznih napetosti v spodnji armaturi in rezultanto tlačnih napetosti betona), z' je razdalja med težiščema spodnje in zgornje vzdolžne armature, a' pa je oddaljenost težišča zgornje (tlačne) armature od zgornjega roba nosilca.

Prispevke k upogibni odpornosti AB prečnega prereza v požarnem projektnej stanju prikazujemo na sliki 10.



Slika 10: Upogibna odpornost AB prečnega prereza v požarnem projektnej stanju

Projektna upogibna odpornost prečnega prereza AB nosilca je torej enaka izračunani upogibni odpornosti, ki temelji na učinkovitem prečnem prerezu, ki smo ga določili z izotermo 500°C:

$$M_{Rd,t,fi} = M_{500}. \quad (54)$$

Dokazati moramo, da v skladu z neenačbo (1) velja:

$$M_{Rd,t,fi} \geq M_{Ed,t,fi}, \quad (55)$$

kjer je $M_{Ed,t,fi}$ projektna obremenitev nosilca v požarnem projektnej stanju.

3.4.2 Metoda območij

3.4.2.1 Načela in področja uporabe

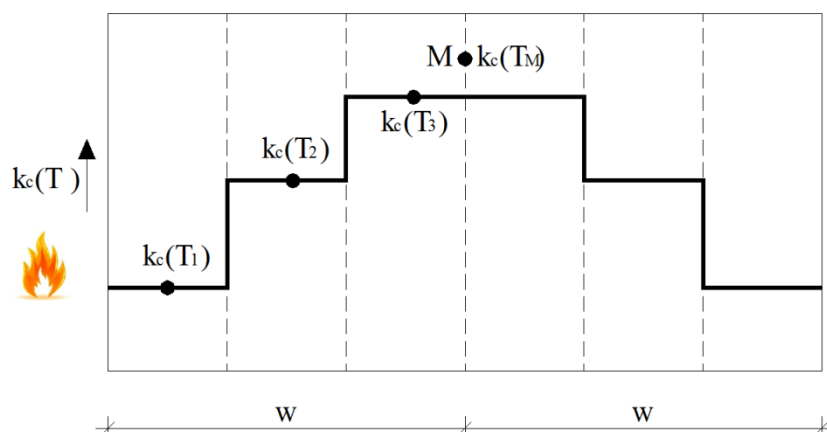
Metoda območij je primerna za analizo osno-upogibne odpornosti armiranih in prednapetih betonskih prečnih prereзов, ki so izpostavljeni standardni požarni krivulji temperatura-čas. Tako kot metoda izoterme 500°C tudi metoda območij temelji na zmanjšanju prečnega prereза elementa. Metoda območij je natančnejša od metode izoterme 500°C.

Metoda temelji na predpostavki, da pri požaru poškodovana območja betona pri računu nosilnosti zanemarimo, preostali del betona pa ohrani začetne mehanske lastnosti. K požarni odpornosti prečnega prereза upoštevamo tudi prispevek vzdolžne armature. Širino poškodovanega območja izračunamo s pomočjo razdelitve prečnega prereза na več območij, za katere ocenimo srednje temperature in pripadajoče, ustrezno reducirane tlačne trdnosti betona. Ko poznamo širino poškodovanega območja, prečni prereз ustrezno zmanjšamo – izračunamo reducirane dimenzije prečnega prereза. Nadaljnji račun odpornosti poteka po postopkih, ki veljajo za projektiranje pri normalnih temperaturah z upoštevanjem ustreznih delnih varnostnih faktorjev za lastnosti materialov, to pomeni, da je postopek računa takšen kot pri metodi izoterme 500°C.

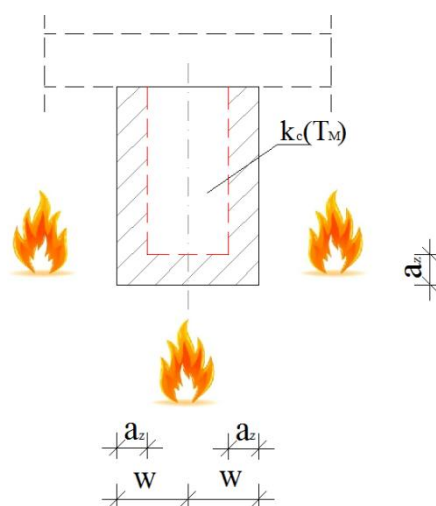
3.4.2.2 Ocena požarne odpornosti osno-upogibno obremenjenega AB prečnega prereза

Računski postopek za oceno požarne odpornosti AB prečnega prereза z metodo območij je sledeč:

- polovico prečnega prereза razdelimo na vzporedna območja (vsaj 3) enakih debelin (slika 11). Pri tem privzamemo, da širina prereза znaša $2w$,
- s pomočjo temperaturnega profila za določen čas trajanja požara za vsako območje ocenimo srednjo temperaturo in pripadajočo reducirano tlačno trdnost betona,
- temperaturo in trdnost določimo tudi za referenčno točko M, ki leži na težiščni liniji prereза (glej sliko 11),
- izračunamo srednji redukcijski faktor tlačne trdnosti betona za vzporedna območja in v odvisnosti od redukcijskega faktorja v točki M še širino poškodovanega območja. V primeru, da je prečni prereз izpostavljen požaru s treh strani privzamemo, da je širina poškodovanega območja spodaj enaka izračunanim vrednostim ob straneh (slika 12),
- dimenzije prečnega prereза zmanjšamo za širino poškodovanih območij, reduciranemu prerezu pa ohranimo začetne lastnosti betona,
- s pomočjo temperaturnega profila ocenimo še temperature v vzdolžnih armaturnih palicah in izračunamo reducirane trdnosti jekla,
- izračunamo osno-upogibno odpornost prečnega prereза ob upoštevanju zmanjšane prečnega prereза in reduciranih trdnosti armaturnih palic,
- preverimo pogoj (1): $E_{d,t,fi} \leq R_{d,t,fi}$.



Slika 11: Razdelitev prečnega prereza, izpostavljenega požaru na obeh straneh, na vzporedna območja enakih debelin



Slika 12: Poškodovano območje prečnega prereza, ko je prerez izpostavljen požaru s treh strani

Opisani postopek predstavimo še z enačbami. Obravnavamo prečni prerez AB nosilca, ki je v požarnem projektnem stanju obremenjen z osno silo $N_{Ed,t,fi}$ in upogibnim momentom $M_{Ed,t,fi}$. Srednji redukcijski faktor tlačne trdnosti betona za vzporedna območja izračunamo z izrazom:

$$k_c = \frac{\left(1 - \frac{0.2}{n}\right)}{n} \cdot \sum_{i=1}^n k_c(T_i), \quad (56)$$

kjer je n število vzporednih območij na širini w , $k_c(T_i)$ pa je redukcijski faktor trdnosti za i -to območje. Širino poškodovanega območja izračunamo z izrazom:

$$a_z = w \cdot \left[1 - \frac{k_c}{k_c(T_M)}\right]. \quad (57)$$

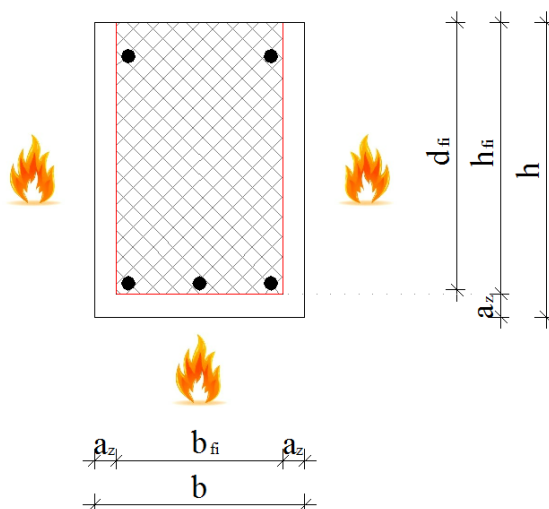
Pri tem je $k_c(T_M)$ redukcijski faktor tlačne trdnosti betona v točki M. V primeru, da je prečni prerez izpostavljen požaru s treh strani, so reducirane dimenzije prečnega prereza:

$$b_{fi} = b - 2 \cdot a_z,$$

$$h_{fi} = h - a_z \text{ in}$$

$$d_{fi} = d = h - a.$$

Reducirane dimenzije prečnega prereza prikazujemo na sliki 13.



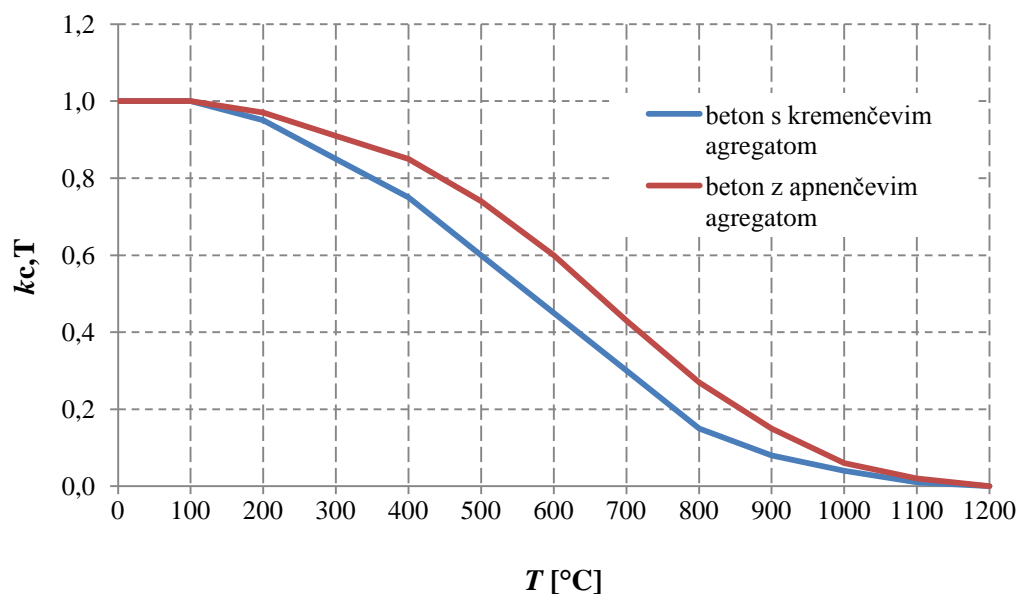
Slika 13: Reducirane dimenzije učinkovitega prečnega prereza

Nadaljnji postopek (glej enačbe (46) - (55)) je podrobno opisan že pri metodi izoterme 500°C, zato ga tukaj ne podajamo.

3.4.3 Zmanjšanje trdnosti betona in jekla za armiranje pri povišanih temperaturah

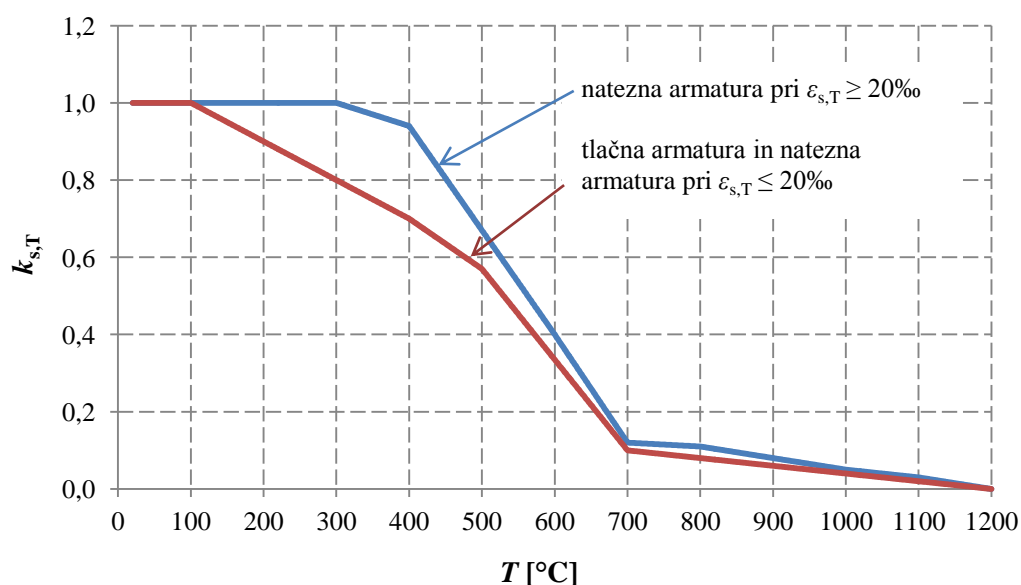
Vrednosti redukcijskih faktorjev za karakteristično tlačno trdnost betona in karakteristično trdnost jekla upoštevamo v skladu s standardom SIST EN 1992-1-2:2005. Podane redukcijske trdnosti veljajo samo za hitrosti segrevanja do nastopa najvišje temperature plinov, podobne tistim, ki se pojavijo pri standardnemu požaru.

Na sliki 14 prikazujemo redukcijski faktor $k_{c,T}$ za zmanjšanje karakteristične tlačne trdnosti betona $f_{c,k}$ pri povišanih temperaturah in sicer v odvisnosti od vrste uporabljenega agregata.



Slika 14: Redukcijski faktor za zmanjšanje karakteristične tlačne trdnosti betona pri povišanih temperaturah v skladu s standardom SIST EN 1992-1-2:2005

Na sliki 15 pa prikazujemo redukcijski faktor $k_{s,T}$ za zmanjšanje karakteristične trdnosti jekla za armiranje $f_{y,k}$ razreda N (hladno obdelano jeklo za armiranje) pri povišanih temperaturah. Redukcijski faktorji so odvisni od vrste obremenitve jekla (natezna ali tlačna obremenitev).

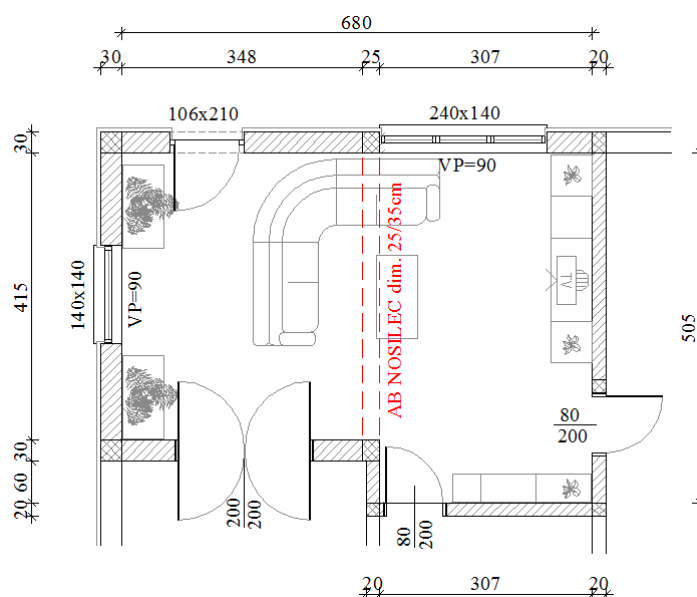


Slika 15: Redukcijski faktor za zmanjšanje karakteristične trdnosti jekla za armiranje pri povišanih temperaturah v skladu s standardom SIST EN 1992-1-2:2005

4 RAČUNSKI PRIMER: POŽARNA ODPORNOST AB PROSTOLEŽEČEGA NOSILCA

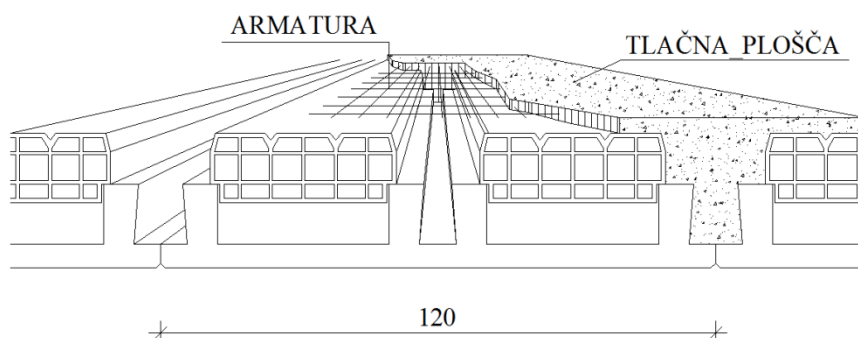
4.1 Osnovni podatki

Armiranobetonski (AB) nosilec premošča krajšo razpetino v dnevno bivalnem prostoru v pritličju enodružinske stanovanjske hiše. Tlorisne dimenzije prostora so 6.80×4.15 m z razširitvijo 0.6×3.07 m na daljši notranji strani. Skupna tlorisna površina prostora znaša 31 m^2 , svetla višina pa je 2.8 m. Nosilec je pravokotnega prečnega prereza z dimenzijami prereza $b/h = 25/35$ cm. Svetla razpetina nosilca je 4.15 m. Lego nosilca prikazujemo na sliki 16.



Slika 16: Tloris požarnega sektorja s prikazom obravnavanega armiranobetonskega nosilca

Strop nad prostorom je montažne izvedbe, nosilen le v eni smeri, to je v daljši smeri prostora, pri čemer vmesno podpore predstavlja obravnavan AB nosilec. Za nosilno konstrukcijo stropa so bile izbrane omnia prednapete rebraste plošče celer-cem. Njihova glavna prednost je velika upogibna togost pri relativno majhni debelini. Poleg tega pri izvedbi ne potrebujejo dodatnega podpiranja in opaženja, saj so samonosilne do razpetine 5 m. Nosilno konstrukcijo stropa prikazujemo na sliki 17.

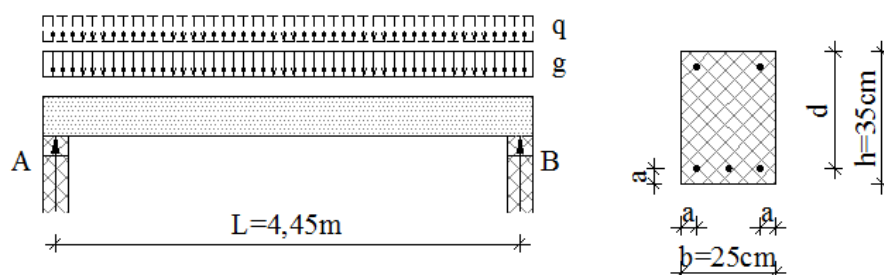


Slika 17: Nosilna konstrukcija stropa - omnia prednapete rebraste plošče celer-cem

4.1.1 Geometrijski in materialni podatki ter podatki o obtežbi nosilca

• Geometrija:

Nosilec modeliramo kot prostoležeč nosilec z razpetino 4.45 m. Računski model nosilca prikazujemo na sliki 18.



Slika 18: Prikaz geometrije nosilca in razporeditve obtežbe

• Mehanske lastnosti:

Beton: C 25/30 $f_{ck} = 2.50 \text{ kN/cm}^2$

$f_{ctm} = 0.26 \text{ kN/cm}^2$

$\gamma = 25.0 \text{ kN/m}^3$

Armatura: S 500 $f_{yk} = 50.0 \text{ kN/cm}^2$

V nadaljevanju izračunamo še statično višino prereza:

$$d = h - a = 35 - 3.5 = 31.5 \text{ cm}.$$

a je zaščitni oziroma nazivni krovni sloj betona c_{nom} , ki je določen kot najmanjši krovni sloj c_{min} , povečan za projektno odstopanje (priporočeno 10 mm), kar zapišemo z izrazom:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = c_{min} + 10 \text{ mm} = 25 + 10 = 35 \text{ mm, kjer je}$$

$$c_{min} = \max \{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}\} = \max \{22; 25 + 0 - 0 - 0; 10\} = 25 \text{ mm}.$$

• Obtežba:

▪ Stalna obtežba:

Sestava tlakov (montažna medetažna konstrukcija):

- parket / keramika: 1 cm	$0.01 \times 15 =$	0.15 kN/m^2
- cementni estrih: 5 cm	$0.05 \times 24 =$	1.20 kN/m^2
- PVC		
- toplotna in zvočna izolacija: 5 cm	$0.05 \times 1.0 =$	0.05 kN/m^2

- omnia prednapete rebraste plošče celer-cem	2.00 kN/m ²
- omet: 2 cm	$0.02 \times 18 = 0.36 \text{ kN/m}^2$
	$g_1 = 3.76 \text{ kN/m}^2$

Lastna teža nosilca: $g_2 = b \cdot h \cdot \gamma_b = 0,25 \cdot 0,35 \cdot 25 = 2.19 \text{ kN/m}$

- Koristna obtežba: $q = 2.0 \text{ kN/m}^2$ (kategorija A – SIST EN 1991-1-1:2004)
- Z upoštevanjem vplivne širine določimo linijsko obtežbo obravnavanega nosilca v prečni smeri:
 - vplivna širina: $l_v = 3.53 \text{ m}$
 - stalna obtežba: $g = 3.53 \cdot 3.76 + 2.19 = 15.46 \text{ kN/m}$
 - koristna obtežba: $q = 3.53 \cdot 2,0 = 7.06 \text{ kN/m}$

4.2 Dimenzioniranje armiranobetonskega nosilca v osnovnih projektnih stanjih

4.2.1 Projektiranje nosilca v mejnih stanjih nosilnosti (MSN)

4.2.1.1 Projektna obtežba in obremenitev nosilca

Osnovno kombinacijo vplivov za stalna projektna stanja v skladu s standardom SIST EN 1990:2004 zapišemo z izrazom:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (58)$$

Tako znaša projektna obtežba nosilca:

$$q_d = \gamma_g \cdot g + \gamma_q \cdot q = 1.35 \cdot 15.46 + 1.5 \cdot 7.06 = 31.46 \text{ kN}.$$

Obremenitve nosilca so:

$$A_{s,d} = \frac{q_d \cdot L}{2} = \frac{31.46 \cdot 4.45}{2} = 70 \text{ kN in}$$

$$M_{\max,sd} = \frac{q_d \cdot L^2}{8} = \frac{31.46 \cdot 4.45^2}{8} = 77.87 \text{ kN}.$$

4.2.1.2 Dimenzioniranje na upogibno obremenitev

Najprej izračunamo vzdolžno upogibno armaturo:

$$k_d = \frac{M_{\max,sd}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} = \frac{77.87 \cdot 100}{1.67 \cdot 25 \cdot 31.5^2} = 0,188 \rightarrow k_s = 1.121 ,$$

$$A_s = \frac{k_s \cdot M_{\max, sd}}{d \cdot f_{yd}} = \frac{1.121 \cdot 77.87 \cdot 100}{31.5 \cdot 43.48} = 6.37 \text{ cm}^2.$$

Preverimo minimalno upogibno armaturo:

$$A_{s, \min} = 0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b \cdot d = 0.26 \cdot \frac{0.26}{50} \cdot 25 \cdot 31.5 = 1.06 \text{ cm}^2,$$

$$A_{s, \min} = 0.0013 \cdot b \cdot d = 0.0013 \cdot 25 \cdot 31.5 = 1.02 \text{ cm}^2.$$

IZBEREMO ARMATURO: **4Φ16** S 500 spodaj ($A_{s,dej} = 8.04 \text{ cm}^2$)
2Φ14 S 500 zgoraj ($A_{s,dej} = 3.08 \text{ cm}^2$)

4.2.1.3 Dimenzioniranje na strižno obremenitev

V območjih nosilca, kjer velja $V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$, računska strižna armatura ni potrebna. V območjih, kjer velja $V_{Ed} \geq V_{Rd,c}$, pa moramo zagotoviti ustrezno strižno armaturo. Pri tem pa mora biti natezna vzdolžna armatura sposobna prevzeti tudi dodatno natezno silo, ki jo povzroči strig. Pri tem je V_{Ed} projektna vrednost prečne sile v obravnavanem prečnem prerezu zaradi zunanje obtežbe, $V_{Rd,c}$ pa je projektna strižna odpornost AB prečnega prereza brez strižne armature.

Najprej izračunamo $V_{Rd,c}$ z enačbo:

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \geq [v_{\min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d, \text{ kjer je}$$

$$C_{Rd,c} = \frac{0.18}{\gamma_c} = \frac{0.18}{1.5} = 0.12,$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d[\text{mm}]}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{315}} = 1.80 \leq 2.0,$$

$$k_1 = 0.15,$$

$$v_{\min} = 0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{c,k}^{1/2} = 0.035 \cdot 1.80^{3/2} \cdot 25^{1/2} = 0.42,$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} = \frac{8.04}{25 \cdot 31.5} = 0.0102 \leq 0.02 \text{ in}$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} = 0.$$

Računska strižna odpornost betonskega elementa brez strižne armature je torej:

$$V_{Rd,c} = [0.12 \cdot 1.80 \cdot (100 \cdot 0.0104 \cdot 25)^{1/3} \cdot 0.15] \cdot 25 \cdot 31.5 = 50.0 \text{ kN},$$

$$[v_{\min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d = [0.42 + 0.15] \cdot 25 \cdot 31.5 = 33.19 \text{ kN},$$

$$V_{Rd,c} = \max(50.0 \text{ kN} ; 33.19 \text{ kN}) = 50.0 \text{ kN}.$$

Izvedemo kontrolo strižne odpornosti :

$$V_{Ed} = A_{sd} = 70.0 \text{ kN} > V_{Rd,c} = 50.0 \text{ kN} . \quad \text{POTREBNA JE RAČUNSKA STRIŽNA ARMATURA!}$$

Izvedemo tudi kontrolo AB prereza:

$$V_{Rd,max} = \frac{1}{2} \cdot 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot v_1 \cdot f_{cd} = \frac{1}{2} \cdot 0.9 \cdot 31.5 \cdot 25 \cdot 0.54 \cdot 1.67 = 318.9 \text{ kN} = 69.80 \text{ kN} > V_{Ed} = 69.80 \text{ kN} ,$$

$$v_1 = 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) = 0.54 ,$$

kjer je $V_{Rd,max}$ največja računska prečna sila, ki jo lahko prenese nosilec, omejena z drobljenjem tlačne diagonale formiranega loka pri strižnem mehanizmu. Kontrola pokaže, da AB prerez ustreza.

Strižna armatura v območju minimalne armature, kjer računska strižna armatura ni potrebna, znaša:

$$\rho_{w,min} = \frac{0.08 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} = \frac{0.08 \cdot \sqrt{25}}{500} = 0.00080 ,$$

$$S_{l,max} = 0.75 \cdot d = 0.75 \cdot 31.5 = 23.6 \text{ cm} ,$$

$$\frac{A_{sw,min}}{s} = \rho_{w,min} \cdot b_w = 2.00 \text{ cm}^2/\text{m} \rightarrow n = 2 \rightarrow \frac{A_{sw1,min}}{s} = 1.00 \text{ cm}^2/\text{m}.$$

IZBEREMO STREMENA: $\Phi 8 / 20 \text{ cm}$ S 500

Strižna armatura v območju računsko potrebne strižne armature:

$$V_{Rd,s} = \frac{0.9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot A_{sw}}{s} \rightarrow \frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Rd,s}}{0.9 \cdot d \cdot f_{ywd}} = \frac{69.80}{0.9 \cdot 31.5 \cdot 43.48} = 5.66 \text{ cm}^2/\text{m} ,$$

$$n = 2 \rightarrow \frac{A_{sw1}}{s} = 2.83 \text{ cm}^2/\text{m} .$$

IZBEREMO STREMENA: $\Phi 8 / 15 \text{ cm}$ S 500

Širina območja računsko potrebne strižne armature (razdalja od podpore):

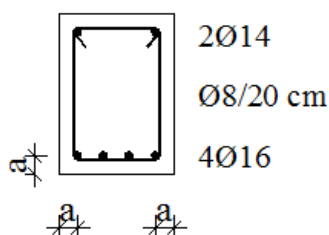
$$x'_B = \frac{V_{Ed} - V_{Rd,c}}{q_{sd}} = \frac{70.0 - 50.0}{(1.35 \cdot 15.46 + 1.5 \cdot 7.06) \cdot 100} = 63.6 \text{ cm} .$$

Dodatna natezna armatura, ki jo mora prevzeti vzdolžna natezna armatura:

$$\Delta A_{sl} = \frac{V_{Ed}}{2 \cdot f_{yd}} = \frac{70.0}{2 \cdot 43.48} = 0.80 \text{ cm}^2/\text{m}.$$

4.2.1.4 Izbrana vzdolžna upogibna in strižna armatura nosilca

- spodaj: **4Φ16** S 500 (dodatna natezna armatura že upoštevana)
- zgoraj: **2Φ14** S 500
- stremena: **Φ8/20 cm** S 500, na območju računsko potrebne strižne armature: **Φ8/15cm** S500



Slika 19: Prikaz izbrane armature v prečnem prerezu nosilca

4.2.2 Projektiranje nosilca v mejnih stanjih uporabnosti (MSU) – kontrola pomikov

V mejnih stanjih uporabnosti AB konstrukcij v splošnem preverjamo napetosti v betonu oziroma armaturi, širino razpok in pomike. V okviru diplomske naloge preverimo le pomike AB nosilca.

4.2.2.1 Projektna obtežba in obremenitev nosilca

Skladno s standardom SIST EN 1990:2004 trenutne in trajne pomike AB konstrukcij preverjamo pri navidezno stalni kombinaciji vplivov, ki jo zapišemo z izrazom:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}. \quad (59)$$

Obravnavan nosilec je obtežen s stalno in koristno obtežbo. Koristno obtežbo smo uvrstili v kategorijo A, tako da je faktor ψ_2 enak 0.3.

Računska oziroma projektna obtežba nosilca v mejnih stanjih uporabnost tako znaša:

$$q_{Ed}^{MSU} = g + \psi_{2,1} \cdot q = 15.46 + 0.3 \cdot 7.06 = 17.58 \text{ kN/m}.$$

Projektni upogibni moment je največji na sredini razpona in je:

$$M_{Ed}^{MSU} = \frac{q_{Ed}^{MSU} \cdot L^2}{8} = \frac{17.58 \cdot 4.45^2}{8} = 43.52 \text{ kNm}.$$

Pri tem je projektna osna sila: $N_{Ed}^{MSU} = 0$.

4.2.2.2 Trenutni navpični pomik

Trenutni navpični pomik na sredini razpetine obravnavanega AB nosilca je $w_{\text{inst}} = 0.88$ cm. Pomik izračunamo ob predpostavki, da nosilec razpoka, vendar ne po celotni dolžini. Tako predpostavimo, da je obnašanje nosilca nekje vmes med obnašanjem nerazpokanega elementa ($w_I = 0.29$ cm) in popolnoma razpokanega elementa ($w_{II} = 0.91$ cm).

Skladno s standardom SIST EN 1992-1-1:2005 upoštevamo, da se videz in splošna uporabnost konstrukcije poslabša, če računski pomik preseže $1/250$ razpetine. Ugotovimo, da trenutni pomik obravnavanega AB nosilca ne prekorači prej omenjene mejne vrednosti, torej:

$$w_{\text{inst}} = 0.88 \text{ cm} < L/250 = 1.78 \text{ cm}.$$

4.2.2.3 Končni navpični pomik

Trajni navpični pomik na sredini razpetine AB nosilca zaradi krčenja in lezenja, pri čemer upoštevamo učinke stalnih vplivov in navidezno stalnih vrednosti spremenljivih vplivov, pa je $w_{\text{fin}} = 1.23$ cm. Pri tem znaša prispevek krčenja betona k trajnemu pomiku $w_{\text{cs}} = 0.24$ cm. Ugotovimo, da tudi trajni pomik nosilca ne prekorači mejne vrednosti, torej:

$$w_{\text{fin}} = 1.23 \text{ cm} < L/250 = 1.78 \text{ cm}.$$

4.3 Požarni scenarij

4.3.1 Požarni sektor

Požarni sektor je prostor znotraj zgradbe in je ograjen z ločilnimi elementi, ki med obravnavanim požarom preprečujejo širitev požara izven sektorja. V obravnavanem primeru je to dnevno bivalni prostor v enodružinski hiši, tlorisne površine 31 m^2 ter svetle višine 2.8 m. Prostor ima naslednje odprtine - na daljši zunanji steni so balkonska vrata za izhod na vrt dimenzij 1.0×2.3 m ter okno dimenzij 2.4×1.4 m. Na krajši zunanji steni je okno dimenzij 1.4×1.4 m. Na notranjih stenah je dvojne standardnih notranjih vrat dimenzij 0.8×2.0 m ter dvokrilna nihajna vrata dimenzij 2.0×2.0 m za prehod v jedilni prostor in kuhinjo.

Za toplotne lastnosti oboda upoštevamo toplotne lastnosti opečnega zidu. Opečni zid je sestavljen iz več različnih materialov, zato moramo vrednost toplotne absorptivnosti b (glej enačbo 16), s katero upoštevamo toplotne lastnosti oboda, izračunati za vsako plast posebej. Račun toplotne absorptivnosti b v skladu s standardom SIST EN 1991-1-2:2005 prikazujemo v preglednici 8.

Preglednica 8: Izračun vrednosti faktorja b za opečni zid

	s_i [m]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	b_i [J/m ² s ^{1/2} K]	s_{lim} [m]	b [J/m ² s ^{1/2} K]
omet	0.02	1600	1050	0,81	1167	0.024	1119
opeka	0.29	1400	920	0,61	886		
TI	0.1	30	1260	0,041	39		

Pri določitvi požarne krivulje predpostavimo za vse površine oboda enako toplotno absorptivnost $b = 1119 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$.

Za obravnavani požarni sektor so predvideni naslednji aktivni ukrepi gašenja požara:

- zunanja gasilska enota,
- varne intervencijske poti in
- gasilski pripomočki.

4.3.2 Projektna vrednost gostote požarne obremenitve

Projektno vrednost gostote požarne obremenitve izračunamo glede na skupno površino tal požarnega sektorja in rabo prostora ter z upoštevanjem uporabe navedenih aktivnih ukrepov za preprečevanje požara. Izračunamo jo z enačbo (26). Podrobnosti izračuna prikazujemo v preglednici 9.

Preglednica 9: Račun projektne vrednosti gostote požarne obremenitve $q_{f,d}$

$q_{f,d} =$		984,9	MJ/m²	projektna vrednost gostote požarne obremenitve
hitrost razvoja požara	srednja			
$q_{f,k} =$	948	MJ/m²	karakteristična gostota požarne obtežbe (STANOVANJA)	
$m =$	0.8		izgorevalni faktor za pretežno celulozne materiale	
$\delta_{q1} =$	1.11		faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na velikost sektorja	
$\delta_{q2} =$	1.0		faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na rabo oz. naselitev (za pisarne, stanovanja, hotele in papirno industrijo: 1.0)	
$\delta_n =$	1.170		faktor, ki upošteva uporabo različnih ukrepov gašenja	
$\delta_{n1} =$	1.0		avtomatski vodni gasilni sistem: 0.61	
$\delta_{n2} =$	1.0		neodvisna preskrba z vodo: 0.87	
$\delta_{n3} =$	1.0		avtomatsko zaznavanje požara in alarm s toploto: 0.87	
$\delta_{n4} =$	1.0		avtomatsko zaznavanje požara in alarm z dimom: 0.73	
$\delta_{n5} =$	1.0		avtomatska povezava alarma z gasilsko enoto: 0.87	
$\delta_{n6} =$	1.0		lastna gasilska enota: 0.61	
$\delta_{n7} =$	0.78		zunanja gasilska enota: 0.78	
$\delta_{n8} =$	1.0		varne intervencijske poti: 1,0 (če niso predvidene: 1.5)	
$\delta_{n9} =$	1.0		gasilski pripomočki: 1,0 (če niso predvideni: 1.5)	
$\delta_{n10} =$	1.5		sistem za odvod dima: 1.0 (če niso predvideni: 1.5)	

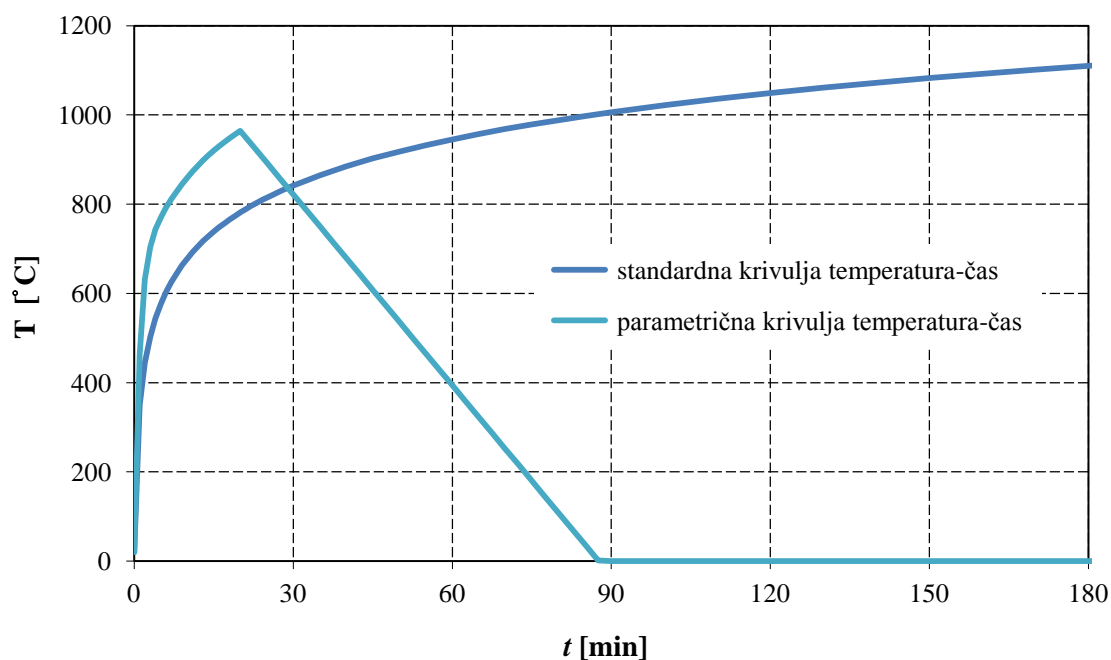
4.3.3 Parametrična požarna krivulja temperatura – čas

V preglednici 10 prikazujemo izračun osnovnih parametrov parametrične požarne krivulje temperatura – čas. Pri tem upoštevamo velikost požarnega sektorja, velikost in lokacijo odprtín v obodu, toplotne lastnosti materiala oboda in projektno vrednost gostote požarne obremenitve. Izkaže se, da je čas, pri katerem v fazi segrevanja nastopi najvišja temperatura, enak mejni vrednosti ($t_{\max} = t_{\lim}$), zato moramo upoštevati korekcijo časa t^* skladno z enačbo (21).

Preglednica 10: Izračun osnovnih parametrov parametrične krivulje

Osnovni podatki požarnega sektorja			
$A_f =$	31	m^2	površina tala požarnega sektorja
$A_v =$	14.8	m^2	celotna površina vertikalnih odprtín v vseh stenah
$A_t =$	128.40	m^2	celotna površina oboda sektorja (vključno z odprtínami)
$h_{eq} =$	2.3	m	uteženo povprečje višin oken v vseh stenah
Osnovni parametri parametrične krivulje temperatura - čas			
$O =$	0.174	$m^{1/2}$	faktor odprtín ($0.02 \leq O \leq 0.2$)
$b =$	1119	$J/m^2 s^{1/2}$	faktor, ki upošteva toplotne lastnosti oboda ($100 \leq b \leq 2200$)
$\Gamma =$	20.385		brezdimenzijski parameter (če je $\Gamma=1$, se krivulja približa standardni krivulji temperatura - čas)
$t_{\max} =$	0.33	h	čas, pri katerem v fazi segrevanja nastopi najvišja temperatura
$t_{\max}^* =$	6.795	h	
$t_{\lim} =$	20	min	čas, ki je odvisen od hitrosti razvoja požara - srednje hitro razvijajoči požar (če je $t_{\max} = t_{\lim}$, je potrebno upoštevati $t^* = t \cdot \Gamma_{\lim}$) korigiraj t^*!
$\Gamma_{\lim} =$	3.418		
$O_{\lim} =$	0.071	$m^{1/2}$	
$q_{t,d} =$	237.8	MJ/m^2	projektna vrednost gostote požarne obremenitve glede na skupno površino oboda A_t ($50 \leq q_{t,d} \leq 1000$)

Najvišja temperatura nastopi pri $t_{\max} = 20$ min in je $T_{\max} = 964.4^\circ C$. Parametrično požarno krivuljo za obravnavan požarni sektor (dnevno bivalni prostor) prikazujemo na sliki 20 in jo primerjamo s standardno požarno krivuljo.



Slika 20: Parametrična krivulja temperatura – čas za dnevno bivalni prostor s tlorisno površino $A_f=31m^2$

4.3.4 Enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru

Vpliv parametrične požarne krivulje prevedemo v enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru v skladu z enačbo (30). Izračun prikazujemo v preglednici 11.

Parameter α_v (enačba (32)) preseže mejno vrednost, tako da pogoj $0.025 \leq \alpha_v \leq 0.25$ ni izpolnjen. Ker pa je požarni sektor majhen ($A_f < 100 m^2$), faktor w_f izračunamo na poenostavljen način, t.j. z enačbo (35), kjer vrednost parametra α_v ne potrebujemo.

Preglednica 11: Enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru $t_{e,d}$

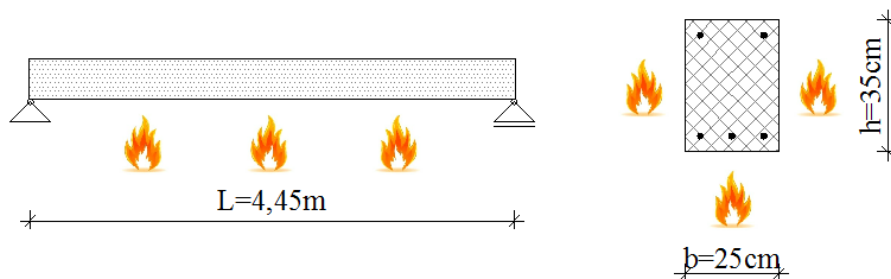
$t_{e,d} =$	31,3	min	Enakovreden čas izpostavljenosti požaru
$H =$	2.8	m	svetla višina požarnega sektorja
$\alpha_v =$	0.476		($0.025 \leq \alpha_v \leq 0.25$) - POGOJ NI IZPOLNJEN!
$\alpha_h =$	0.0		
$b_v =$	69.15		($b_v \geq 10$)
$w_f =$	0.58		faktor prezračevanja (ker je $A_f = 31m^2 < 100m^2$)
$k_b =$	0.055	min·m ² /MJ	faktor pretvorbe (ker je $720 \leq b \leq 2500$)
$k_c =$	1.0		korekcijski faktor za material nosilnega prečnega prereza (za AB je $k_c = 1.0$)

Enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru je $t_{e,d} = 31.3$ min. To pomeni, da mora imeti obravnavan AB nosilec požarno odpornost glede na kriterij nosilnosti vsaj R 60.

4.3 Temperaturni del požarne analize

V prvem delu požarne analize določimo razvoj temperature v nosilcu med požarom. Pri tem moramo upoštevati predviden požarni scenarij ter temperaturno odvisne toplotne lastnosti materialov.

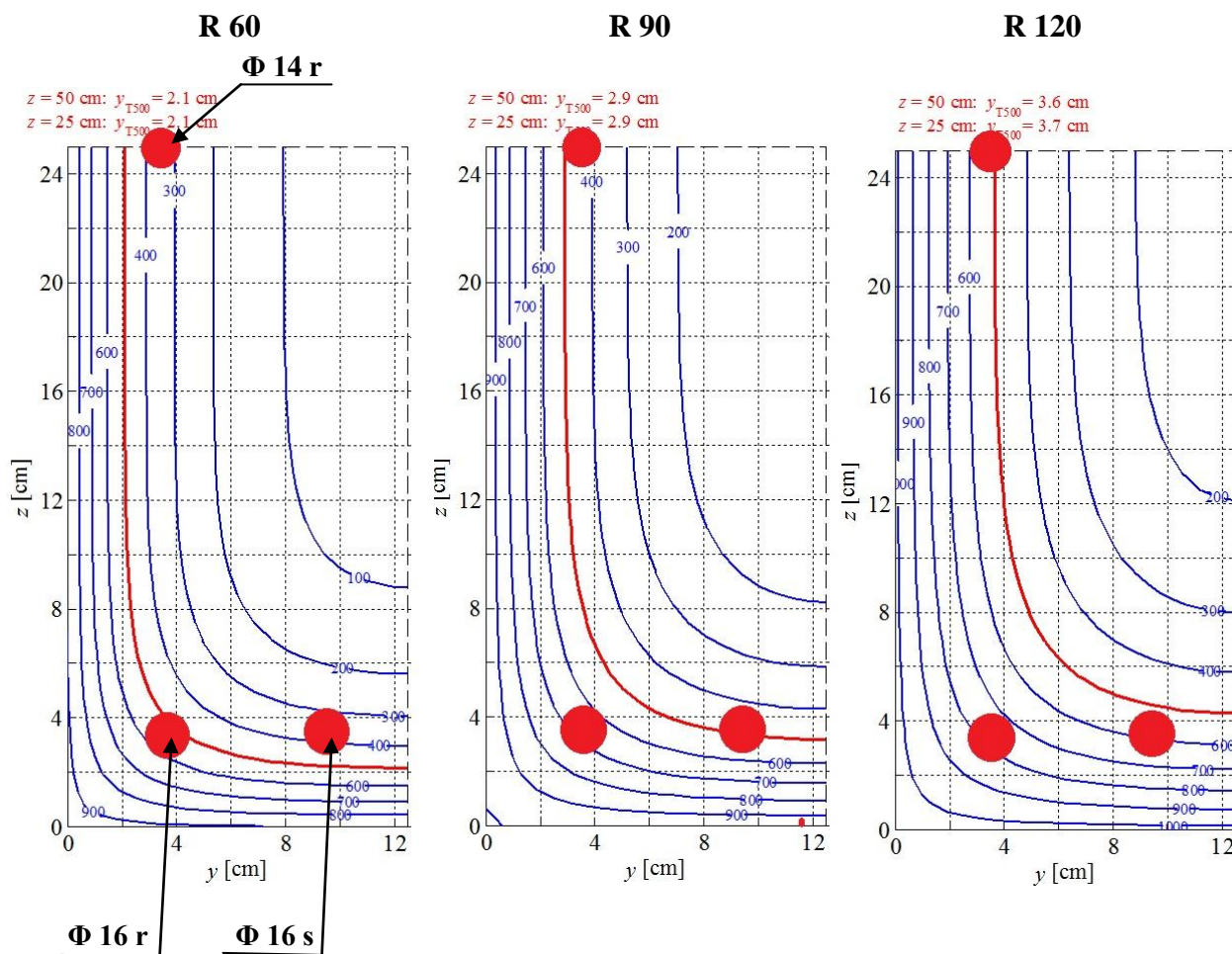
Predpostavimo, da je nosilec izpostavljen požaru s treh strani (glej sliko 21). Upoštevamo, da se temperatura plinov v požarnem sektorju spreminja skladno s standardno požarno krivuljo (enačba 7). Predpostavimo, da je temperatura celotnega požarnega sektorja ali vsaj dela na območju vzdolž nosilca enakomerna. S tem se temperaturna analiza poenostavi, saj lahko analiziramo le časovno razporeditev temperatur v karakterističnem prečnem prerezu nosilca. Vpliv armature na časovno spreminjanje temperature v nosilcu med požarom zanemarimo. Privzamemo, da so temperature v posamezni temperaturni palici kar enake temperaturi v betonu na mestu armaturne palice.



Slika 21: Vpliv požara na nosilec

Na sliki 22 prikazujemo razporeditev temperatur po prečnem prerezu nosilca po 60, 90 in 120 minutah izpostavljenosti standardnemu požaru. Zaradi simetrije temperature prikazujemo le za polovico prečnega prereza.

S pomočjo temperaturnih profilov lahko določimo reducirane dimenzije prečnega prereza nosilca ter ocenimo temperature v vzdolžnih armaturnih palicah.



Slika 22: Temperaturni profili za pravokotni prečni prerez dimenzij 25/35 cm za izpostavljenost standardnemu požaru s treh strani R 60, R 90 in R 120 z vrisano armaturo

Odčitane temperature v armaturnih palicah po 60, 90 in 120 minutah izpostavljenosti standardnemu požaru prikazujemo v preglednici 12.

Preglednica 12: Temperature v armaturnih palicah

Temperaturni profil	Armaturne palice		
	$\Phi 16 \text{ r}$	$\Phi 16 \text{ s}$	$\Phi 14 \text{ r}$
R 60	520°C	360°C	313°C
R 90	657°C	485°C	413°C
R 120	753°C	584°C	490°C

4.4 Mehanska analiza

4.4.1 Projektna obtežba in obremenitev nosilca

Kombinacijo zunanjih vplivov v požarnem projektnem stanju, skladno s standardom SIST EN 1990:2004, zapišemo z izrazom:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_d + \Psi_{2,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} , \quad (60)$$

Pomen oznak v izrazu (60) je opisan že v poglavju 2.2.

Računska oziroma projektna obtežba nosilca v požarnem projektnem stanju tako znaša:

$$q_{\text{Ed,fi}} = g + \Psi_{2,1} \cdot q = 15.46 + 0.3 \cdot 7.06 = 17.58 \text{ kN/m.}$$

Projektni upogibni moment je največji na sredini razpona in je:

$$M_{\text{Ed,t,fi}} = \frac{q_{\text{Ed,fi}} \cdot L^2}{8} = \frac{17.58 \cdot 4.45^2}{8} = 43.52 \text{ kNm.}$$

Pri tem je projektna osna sila: $N_{\text{Ed,t,fi}} = 0$.

V mehanskem delu požarne analize na poenostavljen način skladno standardom SIST EN 1992-1-2:2005 ocenimo požarno odpornost obravnavanega nosilca. Požarna odpornost nosilca je sposobnost, da izpolni zahtevano funkcijo (nosilnost, celovitost in/ali toplotna izolativnost) pri določeni obtežbi, pri določeni izpostavljenosti požaru in za določeno časovno obdobje. V obravnavanem primeru mora imeti obravnavan AB nosilec pri izpostavljenosti standardni požarni krivulji požarno odpornost glede na kriterij nosilnosti vsaj R60.

Požarno odpornost ocenimo z dvema poenostavljenima računskima metodama in sicer z:

- metodo izoterme 500°C in
- metodo območij.

Tretja poenostavljena računska metoda, t.j. metoda za oceno požarne odpornosti na podlagi ocene ukrivljenosti, je namenjena stebrom, zato jo v računskem primeru ne uporabimo.

4.4.2 Račun požarne odpornosti AB nosilca z metodo izoterme 500°C

Metoda izoterme 500°C temelji na predpostavki, da poškodovani del betona, t.j. tisti del betona, v katerem temperatura med požarom preseže 500°C, ne prispeva k nosilnosti, zato ga v računu upogibne odpornosti prečnega prereza nosilca ne upoštevamo. Prispevke armaturnih palic k upogibni odpornosti prereza upoštevamo skladno s temperaturno odvisnimi redukcijskimi faktorji.

4.5.2.1 Mehanska analiza pri R 60

Upogibno odpornost prečnega prereza na sredini razpona obravnavanega nosilca, t.j. tam, kjer je upogibna obremenitev največja, izračunamo pri različnih časih trajanja požara. Najprej izračunamo pri času izpostavljenosti požaru 60 minut. Reducirane dimenzije prečnega prereza, ki jih določa izoterma 500°C, določimo s pomočjo temperaturnega profila R60, ki je prikazan na sliki 22.

Reducirana širina tlačne cone ter statična višina prereza sta:

$$b_{fi} = b - 2 \cdot y_{T500} = 25 - 2 \cdot 2.1 = 20.8 \text{ cm},$$

$$d_{fi} = d - a = 35 - 3.5 = 31.5 \text{ cm}.$$

Osnovno nosilnost spodnjih štirih armaturnih palic izračunamo z enačbo (49). Pri tem za posamezno armaturno palico upoštevamo redukcijski faktor trdnosti jekla $k_{s,T}$, ki je odvisen od temperature. Ta je $T_{\Phi 16,R} = 520^\circ\text{C}$ za zunanjo in $T_{\Phi 16,S} = 360^\circ\text{C}$ za notranjo armaturno palico (glej preglednico 12). Pri računu upoštevamo simetrično razporeditev temperaturnega polja in armature.

$$N_s = \sum_{i=1}^4 A_{s,i} \cdot f_{sd,fi,i} = \sum_{i=1}^4 A_{s,i} \cdot k_{s,T,i} \cdot \frac{f_{yk,i}}{\gamma_{s,fi}} =$$

$$= 2 \cdot 2.01 \cdot 0.616 \cdot \frac{50}{1.0} + 2 \cdot 2.01 \cdot 0.964 \cdot \frac{50}{1.0} = 317.6 \text{ kN}$$

Podobno izračunamo tudi nosilnost zgornjih dveh armaturnih palic. Uporabimo enačbo (49). Temperatura v zgornji palici je $T_{\Phi 12} = 313^\circ\text{C}$.

$$N_s = \sum_{i=1}^2 A_{s,i} \cdot f_{sd,fi,i} = \sum_{i=1}^2 A_{s,i} \cdot k_{s,T,i} \cdot \frac{f_{yk,i}}{\gamma_{s,fi}} = 2 \cdot 1.13 \cdot 0.787 \cdot \frac{50}{1.0} = 88.9 \text{ kN}.$$

Lego nevtralne osi prereza v požarnem projektnem stanju izračunamo z enačbo (48). Projektna tlačna trdnost betona f_{cd} v požarnem projektnem stanju je enaka karakteristični tlačni trdnosti betona pri običajni temperaturi f_{ck} , saj so varnostni faktorji za lastnosti materiala $\gamma_{M,fi}$ v požarnem projektnem stanju enaki 1.0.

$$x = \frac{N_s - N_s' - N_{Ed,t,fi}}{0.8 \cdot b_{fi} \cdot f_{cd}} = \frac{317.6 - 88.9}{0.8 \cdot 20.8 \cdot 2.5} = 5.50 \text{ cm}.$$

Rezultanto tlačnih napetosti v betonu izračunamo z enačbo (47):

$$N_c = 0.8 \cdot x \cdot b_{fi} \cdot f_{cd} = 0.8 \cdot 5.50 \cdot 20.8 \cdot 2.5 = 228.8 \text{ kN}.$$

Upogibno odpornost obravnavanega prečnega prereza AB nosilca, ki temelji na reduciranem prerezu, izračunamo z enačbo (53):

$$M_{500} = N_c \cdot (d_{fi} - 0.4 \cdot x) + N_s' \cdot (d_{fi} - a') =$$

$$= 228.8 \cdot (31.5 - 0.4 \cdot 5.5) + 88.9 \cdot (31.5 - 3.5) = 9193.04 \text{ kNcm} = 91.93 \text{ kNm}.$$

Projektna upogibna odpornost prečnega prereza obravnavanega AB nosilca pri 60. minutni izpostavljenosti standardnemu požaru torej znaša:

$$M_{Rd,t,fi} = M_{500} = 91.93 \text{ kNm}.$$

Sedaj lahko preverimo, če je po 60 minutah standardnega požara izpolnjen pogoj (1):

$$\mathbf{R\ 60: } M_{Rd,t,fi} = 91.93 \text{ kNm} > M_{Ed,t,fi} = 43.52 \text{ kNm}.$$

Ugotovimo, da je po 60 minutah izpostavljenosti standardnemu požaru projektna upogibna odpornost karakterističnega prečnega prereza obravnavanega AB nosilca bistveno večja od največje upogibne obremenitve nosilca. To pomeni, da ima obravnavan AB nosilec zahtevano požarno odpornost glede na kriterij nosilnosti, t.j. R60.

V nadaljevanju nas zanima, če je pogoju (1) zadoščeno tudi pri času izpostavljenosti požaru 90 oziroma 120 minut. Tako bomo določili požarno odpornost obravnavanega AB nosilca.

4.5.2.2 Mehanska analiza pri R 90

Postopek računa je enak kot pri analizi za R60. Najprej določimo reducirani dimenziji obravnavanega prečnega prereza pri času izpostavljenosti 90 minut (glej sliko 22):

$$b_{fi} = b - 2 \cdot y_{T500} = 25 - 2 \cdot 2.9 = 19.2 \text{ cm},$$

$$d_{fi} = d = h - a = 35 - 3.5 = 31.5 \text{ cm}.$$

Pripadajoči temperaturi v spodnjih armaturnih palicah sta $T_{\Phi 16,R} = 657^{\circ}\text{C}$ in $T_{\Phi 16,S} = 485^{\circ}\text{C}$. Nosilnost spodnje armature torej je:

$$\begin{aligned} N_s &= \sum_{i=1}^4 A_{s,i} \cdot f_{sd,fi,i} = \sum_{i=1}^4 A_{s,i} \cdot k_{s,T,i} \cdot \frac{f_{yk,i}}{\gamma_{s,fi}} = \\ &= 2 \cdot 2.01 \cdot 0.24 \cdot \frac{50}{1.0} + 2 \cdot 2.01 \cdot 0.711 \cdot \frac{50}{1.0} = 191.15 \text{ kN} \end{aligned}$$

Temperatura v zgornjih armaturnih palicah pa je $T_{\Phi 12} = 413^{\circ}\text{C}$. Nosilnost zgornje armature je:

$$N'_s = \sum_{i=1}^2 A'_{s,i} \cdot f_{sd,fi,i} = \sum_{i=1}^2 A'_{s,i} \cdot k_{s,T,i} \cdot \frac{f_{yk,i}}{\gamma_{s,fi}} = 2 \cdot 1.13 \cdot 0.683 \cdot \frac{50}{1.0} = 77.18 \text{ kN}.$$

Lega nevtralne osi prečnega prereza znaša:

$$x = \frac{N_s - N'_s - N_{Ed,t,fi}}{0.8 \cdot b_{fi} \cdot f_{cd}} = \frac{191.15 - 77.18}{0.8 \cdot 19.2 \cdot 2.5} = 2.97 \text{ cm}.$$

Rezultanta tlačnih napetosti v betonu pa je:

$$N_c = 0.8 \cdot x \cdot b_{fi} \cdot f_{cd} = 0.8 \cdot 2.97 \cdot 19.2 \cdot 2.5 = 114.05 \text{ kN}.$$

Upogibna odpornost prečnega prereza nosilca je:

$$\begin{aligned} M_{500} &= N_c \cdot (d_{fi} - 0.4 \cdot x) + N_s \cdot (d_{fi} - a) = \\ &= 114.05 \cdot (31.5 - 0.4 \cdot 2.97) + 77.18 \cdot (31.5 - 3.5) = 5618.12 \text{ kNcm} = 56.18 \text{ kNm}. \end{aligned}$$

Projektna upogibna odpornost prečnega prereza obravnavanega AB nosilca po 90 minutah izpostavljenosti standardnemu požaru torej znaša:

$$M_{Rd,t,fi} = M_{500} = 56.18 \text{ kNm}.$$

Ugotovimo, da je pogoj (1) izpolnjen tudi pri času 90 minut:

$$\mathbf{R\ 90:} \quad M_{Rd,t,fi} = 56.18 \text{ kNm} > M_{Ed,t,fi} = 43.52 \text{ kNm}.$$

To pomeni, da ima obravnavan AB nosilec požarno odpornost glede na kriterij nosilnosti vsaj R90. Račun ponovimo še pri času 120 minut.

4.5.2.3 Mehanska analiza pri R 120

Reducirani dimenziji obravnavanega prečnega prereza pri času izpostavljenosti 120 minut sta (glej sliko 22):

$$b_{fi} = b - 2 \cdot y_{T500} = 25 - 2 \cdot 3.6 = 17.8 \text{ cm},$$

$$d_{fi} = d = h - a = 35 - 3.5 = 31.5 \text{ cm}.$$

Pripadajoči temperaturi v spodnjih armaturnih palicah sta $T_{\Phi 16,R} = 753^\circ\text{C}$ in $T_{\Phi 16,S} = 584^\circ\text{C}$. Natezna odpornost spodnje armature torej je:

$$\begin{aligned} N_s &= \sum_{i=1}^4 A_{s,i} \cdot f_{sd,fi,i} = \sum_{i=1}^4 A_{s,i} \cdot k_{s,T,i} \cdot \frac{f_{yk,i}}{\gamma_{s,fi}} = \\ &= 2 \cdot 2.01 \cdot 0.114 \cdot \frac{50}{1.0} + 2 \cdot 2.01 \cdot 0.443 \cdot \frac{50}{1.0} = 111.96 \text{ kN}. \end{aligned}$$

Temperatura v zgornjih armaturnih palicah pa je $T_{\Phi 12} = 490^\circ\text{C}$. Tlačna odpornost zgornje armature je:

$$N_s = \sum_{i=1}^2 A_{s,j} \cdot f_{sd,fi,j} = \sum_{i=1}^2 A_{s,j} \cdot k_{s,T,j} \cdot \frac{f_{yk,j}}{\gamma_{s,fi}} = 2 \cdot 1.13 \cdot 0.583 \cdot \frac{50}{1.0} = 65.88 \text{ kN}.$$

Lega nevtralne osi prereza v požarnem projektnem stanju je:

$$x = \frac{N_s - N_s' - N_{Ed,t,fi}}{0.8 \cdot b_{fi} \cdot f_{cd}} = \frac{111.96 - 65.88}{0.8 \cdot 17.8 \cdot 2.5} = 1.29 \text{ cm.}$$

Rezultanta tlačnih napetosti v betonu pa:

$$N_c = 0.8 \cdot x \cdot b_{fi} \cdot f_{cd} = 0.8 \cdot 1.29 \cdot 17.8 \cdot 2.5 = 45.92 \text{ kN.}$$

Upogibna odpornost prečnega prereza nosilca je:

$$\begin{aligned} M_{500} &= N_c \cdot (d_{fi} - 0.4 \cdot x) + N_s' \cdot (d_{fi} - a) = \\ &= 45.92 \cdot (31.5 - 0.4 \cdot 1.29) + 65.88 \cdot (31.5 - 3.5) = 3267.42 \text{ kNcm} = 32.67 \text{ kNm.} \end{aligned}$$

Projektna upogibna odpornost prečnega prereza obravnavanega AB nosilca po 120 minutah izpostavljenosti standardnemu požaru torej znaša:

$$M_{Rd,t,fi} = M_{500} = 32.67 \text{ kNm.}$$

Ugotovimo, da pri času 120 minut pogoj (1) ni izpolnjen, saj je upogibna odpornost karakterističnega prečnega prereza AB nosilca manjša od upogibne obremenitve v požarnem projektnem stanju:

$$\mathbf{R\ 120:} \quad M_{Rd,t,fi} = 32.67 \text{ kNm} < M_{Ed,t,fi} = 43.52 \text{ kNm.}$$

To pomeni, da ima obravnavan AB nosilec požarno odpornost glede na kriterij nosilnosti R90, pri čemer smo za analizo uporabili poenostavljeno računsko metodo izoterme 500°C.

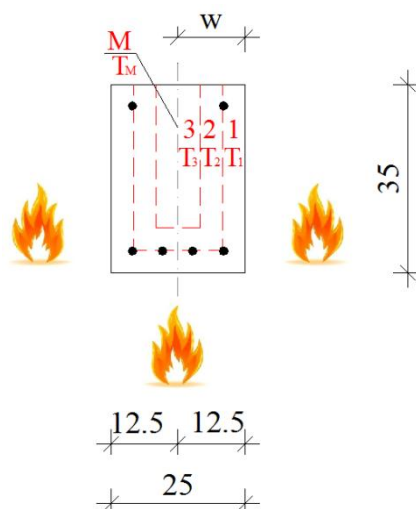
V nadaljevanju ocenimo požarno odpornost nosilca še z metodo območij.

4.4.3 Račun požarne odpornosti AB nosilca z metodo območij

Pri tej metodi polovico prečnega prereza razdelimo na več območij (vsaj 3), za katere ocenimo srednje temperature in pripadajoče, ustrezno reducirane tlačne trdnosti betona. Nato prečni prerez zaradi poškodovanosti pri požaru ustrezno zmanjšamo in sicer tako, da izračunamo reducirane dimenzije prečnega prereza. Nadaljnji račun odpornosti poteka po postopkih, ki veljajo za projektiranje pri normalnih temperaturah z upoštevanjem ustreznih delnih varnostnih faktorjev za lastnosti materialov, to pomeni, da odpornost prečnega prereza določimo podobno kot pri metodi izoterme 500°C.

4.5.3.1 Mehanska analiza pri R 60

Upogibno odpornost karakterističnega prečnega prereza izračunamo pri različnih časih trajanja požara. Najprej izračunamo pri času izpostavljenosti požaru 60 minut. Polovico prečnega prereza razdelimo na 3 vzporedna območja enakih debelin kot prikazujemo na sliki 23. Polovica celotne širine prereza je $w = 12.5 \text{ cm}$. Pri tem točka M leži na težiščni liniji prereza.



Slika 23: Razdelitev polovice prečnega prereza AB nosilca na 3 vzporedna območja z enako debelino

Za vsako izmed območij s pomočjo temperaturnega profila R60 (slika 22) določimo srednjo temperaturo in pripadajoči redukcijski faktor tlačne trdnosti betona $k_{c,T}$. To storimo tudi za točko M:

$$T_1 = 529^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{c,T1} = 0.698$$

$$T_2 = 154^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{c,T2} = 0.984$$

$$T_3 = 66^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{c,T3} = 1.0$$

$$T_M = 53^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{c,T,M} = 1.0$$

Srednji redukcijski faktor, ki vključuje faktor $\frac{1-0.2}{n}$, s katerim upoštevamo spremembo temperature znotraj vsakega območja, izračunamo z enačbo (58):

$$k_c = \frac{1-0.2}{n} \cdot \sum_{i=1}^n k_c(T_i) = \frac{1-0.2}{3} \cdot (0.698 + 0.984 + 1.0) = 0.311 \cdot 2.683 = 0.834.$$

Širino poškodovanega območja nosilca izračunamo z enačbo (59):

$$a_{z,60} = w \cdot \left[1 - \frac{k_c}{k_c(T_m)} \right] = 12,5 \cdot \left[1 - \frac{0.834}{1,0} \right] = 12,5 \cdot 0.166 = 2.075 \text{ cm}.$$

Reducirano širino prečnega prereza v območju tlačnih napetosti izračunamo tako, da od širine prereza na vsaki strani odštejemo širino poškodovanega območja:

$$b_{\text{fi}} = b - 2 \cdot a_z = 25 - 2 \cdot 2.075 = 20.85 \text{ cm}.$$

Ker zgornja površina nosilca ni izpostavljena požaru, je statična višina prečnega prereza enaka kot pri normalnih temperaturah in je:

$$d_{fi} = d = h - a = 35 - 3.5 = 31.5 \text{ cm.}$$

Nadaljnji račun upogibne odpornosti prečnega prereza obravnavanega AB nosilca je enak kot pri metodi izoterme 500°C. Na podlagi temperatur v armaturnih palicah (preglednica 12) izračunamo osno odpornost spodnje oziroma zgornje armature:

$$N_s = \sum_{i=1}^4 A_{s,i} \cdot f_{sd,fi,i} = \sum_{i=1}^4 A_{s,i} \cdot k_{s,T,i} \cdot \frac{f_{yk,i}}{\gamma_{s,fi}} = 317.6 \text{ kN,}$$

$$N'_s = \sum_{i=1}^2 A'_{s,j} \cdot f_{sd,fi,j} = \sum_{i=1}^2 A'_{s,j} \cdot k_{s,T,j} \cdot \frac{f_{yk,j}}{\gamma_{s,fi}} = 88.9 \text{ kN.}$$

Lega nevtralne osi prereza v požarnem projektnem stanju je:

$$x = \frac{N_s - N'_s - N_{Ed,t,fi}}{0.8 \cdot b_{fi} \cdot f_{cd}} = \frac{317.6 - 88.9}{0.8 \cdot 20.85 \cdot 2.5} = 5.48 \text{ cm.}$$

Rezultanta tlačnih napetosti v betonu pa je:

$$N_c = 0.8 \cdot x \cdot b_{fi} \cdot f_{cd} = 0.8 \cdot 5.48 \cdot 20.85 \cdot 2.5 = 228.52 \text{ kN.}$$

Upogibno odpornost obravnavanega prečnega prereza AB nosilca, ki temelji na reduciranem prerezu, izračunamo z enačbo (53) in je:

$$\begin{aligned} M_{MO} &= N_c \cdot (d_{fi} - 0.4 \cdot x) + N'_s \cdot (d_{fi} - a) = \\ &= 228.52 \cdot (31.5 - 0.4 \cdot 5.48) + 88.9 \cdot (31.5 - 3.5) = 9186.66 \text{ kNcm} = 91.86 \text{ kNm.} \end{aligned}$$

Projektna upogibna odpornost prečnega prereza obravnavanega AB nosilca pri 60. minutni izpostavljenosti standardnemu požaru torej znaša:

$$M_{Rd,t,fi} = M_{MO} = 91.86 \text{ kNm.}$$

Podobno kot pri metodi izoterme 500°C ugotovimo, da je po 60 minutah izpostavljenosti standardnemu požaru projektna upogibna odpornost karakterističnega prečnega prereza obravnavanega AB nosilca bistveno večja od največje upogibne obremenitve nosilca (glej pogoj (1)):

$$\mathbf{R\ 60:} \quad M_{Rd,t,fi} = 91.86 \text{ kNm} > M_{Ed,t,fi} = 43.52 \text{ kNm.}$$

V nadaljevanju preverimo pogoj (1) tudi pri času izpostavljenosti požaru 90 oziroma 120 minut. Tako bomo določili požarno odpornost obravnavanega AB nosilca še z metodo območij.

4.5.3.2 Mehanska analiza pri R 90

S pomočjo temperaturnega profila R90 (slika 22) določimo srednjo temperaturo vsakega območja in pripadajoče redukcijske faktorje tlačne trdnosti betona $k_{c,T}$:

$$T_1 = 632^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{c,T1} = 0.545$$

$$T_2 = 237^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{c,T2} = 0.948$$

$$T_3 = 116^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{c,T3} = 0.995$$

$$T_M = 100^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{c,T,M} = 1.0$$

Srednji redukcijski faktor je:

$$k_c = \frac{1-0.2}{n} \cdot \sum_{i=1}^n k_c(T_i) = \frac{1-0.2}{3} \cdot (0.545 + 0.948 + 0.995) = 0.311 \cdot 2.488 = 0.774.$$

Širina poškodovanega območja nosilca je:

$$a_{z,90} = w \cdot \left[1 - \frac{k_c}{k_c(T_m)} \right] = 12.5 \cdot \left[1 - \frac{0.774}{1.0} \right] = 12.5 \cdot 0.2263 = 2.83 \text{ cm}.$$

Reducirana širina prečnega prereza v območju tlačnih napetosti je:

$$b_{fi} = b - 2 \cdot a_z = 25 - 2 \cdot 2.83 = 19.34 \text{ cm},$$

Statična višina prečnega prereza je enaka kot pri mehanski analizi pri R60:

$$d_{fi} = d = h - a = 35 - 3.5 = 31.5 \text{ cm}.$$

V nadaljevanju s pomočjo temperatur v armaturnih palicah (preglednica 12) izračunamo osno odpornost spodnje oziroma zgornje armature:

$$N_s = \sum_{i=1}^4 A_{s,i} \cdot f_{sd,fi,i} = \sum_{i=1}^4 A_{s,i} \cdot k_{s,T,i} \cdot \frac{f_{yk,i}}{\gamma_{s,fi}} = 191.15 \text{ kN},$$

$$N_s^* = \sum_{i=1}^2 A_{s,j}^* \cdot f_{sd,fi,j} = \sum_{i=1}^2 A_{s,j}^* \cdot k_{s,T,j} \cdot \frac{f_{yk,j}}{\gamma_{s,fi}} = 77.18 \text{ kN}.$$

Nevtralna os prereza v požarnem projektne stanju je od zgornjega roba oddaljena za:

$$x = \frac{N_s - N_s^* - N_{Ed,t,fi}}{0.8 \cdot b_{fi} \cdot f_{cd}} = \frac{191.15 - 77.18}{0.8 \cdot 19.34 \cdot 2.5} = 2.95 \text{ cm}.$$

Rezultanta tlačnih napetosti v betonu je:

$$N_c = 0.8 \cdot x \cdot b_{fi} \cdot f_{cd} = 0.8 \cdot 2.95 \cdot 19.34 \cdot 2.5 = 114.11 \text{ kN}.$$

Upogibna odpornost prečnega prereza AB nosilca je:

$$\begin{aligned} M_{MO} &= N_c \cdot (d_{fi} - 0.4 \cdot x) + N_s \cdot (d_{fi} - a) = \\ &= 114.11 \cdot (31.5 - 0.4 \cdot 2.95) + 77.18 \cdot (31.5 - 3.5) = 5620.85 \text{ kNcm} = 56.20 \text{ kNm}. \end{aligned}$$

Projektna upogibna odpornost prečnega prereza obravnavanega AB nosilca pri 90. minutni izpostavljenosti standardnemu požaru torej znaša:

$$M_{Rd,t,fi} = M_{MO} = 56.20 \text{ kNm}.$$

Tudi po 90. minutah izpostavljenosti standardnemu požaru je projektna upogibna odpornost karakterističnega prečnega prereza obravnavanega AB nosilca večja od maksimalne upogibne obremenitve nosilca (glej pogoj (1)):

$$\mathbf{R\ 90: } M_{Rd,t,fi} = 56.20 \text{ kNm} > M_{Ed,t,fi} = 43.52 \text{ kNm}.$$

Pogoj (1) preverimo še pri času trajanja požara 120 minut.

4.3.3.3 Mehanska analiza pri R 120

Srednjo temperaturo vsakega območja in pripadajoče redukcijske faktorje tlačne trdnosti betona $k_{c,T}$ določimo s pomočjo temperaturnega profila R120 (slika 22):

$$T_1 = 706^\circ\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{c,T1} = 0.420$$

$$T_2 = 307^\circ\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{c,T2} = 0.906$$

$$T_3 = 169^\circ\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{c,T3} = 0.979$$

$$T_M = 144^\circ\text{C} \quad \rightarrow \quad k_{c,T,M} = 0.987$$

Srednji redukcijski faktor je:

$$k_c = \frac{1-0.2}{n} \cdot \sum_{i=1}^n k_c(T_i) = \frac{1-0.2}{3} \cdot (0.420 + 0.906 + 0.979) = 0.311 \cdot 2.305 = 0.717$$

Širina poškodovanega območja nosilca je:

$$a_{z,90} = w \cdot \left[1 - \frac{k_c}{k_{c(T_m)}} \right] = 12.5 \cdot \left[1 - \frac{0.717}{0.987} \right] = 12.5 \cdot 0.273 = 3.41 \text{ cm}.$$

Reducirana širina prečnega prereza v območju tlačnih napetosti je:

$$b_{fi} = b - 2 \cdot a_z = 25 - 2 \cdot 3.41 = 18.18 \text{ cm.}$$

Statična višina prečnega prereza je:

$$d_{fi} = d = h - a = 35 - 3.5 = 31.5 \text{ cm.}$$

Osnovna odpornost spodnje oziroma zgornje armature izračunamo na podlagi temperatur v armaturnih palicah (preglednica 12):

$$N_s = \sum_{i=1}^4 A_{s,i} \cdot f_{sd,fi,i} = \sum_{i=1}^4 A_{s,i} \cdot k_{s,T,i} \cdot \frac{f_{yk,i}}{\gamma_{s,fi}} = 111.96 \text{ kN,}$$

$$N_s' = \sum_{i=1}^2 A_{s,j}' \cdot f_{sd,fi,j} = \sum_{i=1}^2 A_{s,j}' \cdot k_{s,T,j} \cdot \frac{f_{yk,j}}{\gamma_{s,fi}} = 65.88 \text{ kN.}$$

Legna nevtralne osi prereza v požarnem projektnejem stanju je:

$$x = \frac{N_s - N_s' - N_{Ed,t,fi}}{0.8 \cdot b_{fi} \cdot f_{cd}} = \frac{111.96 - 65.88}{0.8 \cdot 18.18 \cdot 2.5} = 1.27 \text{ cm.}$$

Rezultanta tlačnih napetosti v betonu je:

$$N_c = 0.8 \cdot x \cdot b_{fi} \cdot f_{cd} = 0.8 \cdot 1.27 \cdot 18.18 \cdot 2.5 = 46.18 \text{ kN.}$$

Upogibna odpornost prečnega prereza AB nosilca izračunamo z enačbo (53) in dobimo:

$$\begin{aligned} M_{MO} &= N_c \cdot (d_{fi} - 0.4 \cdot x) + N_s' \cdot (d_{fi} - a) = \\ &= 46.18 \cdot (31.5 - 0.4 \cdot 1.27) + 65.88 \cdot (31.5 - 3.5) = 3275.85 \text{ kNcm} = 32.75 \text{ kNm.} \end{aligned}$$

Izračunana vrednost je torej projektna upogibna odpornost prečnega prereza obravnavanega AB nosilca:

$$M_{Rd,t,fi} = M_{MO} = 32.75 \text{ kNm.}$$

Podobno kot pri metodi izoterme 500°C tudi v tem primeru pogoj (1) ni izpolnjen, saj je pri času 120 minut projektna upogibna odpornost karakterističnega prečnega prereza obravnavanega AB nosilca manjša od maksimalne upogibne obremenitve nosilca:

$$\mathbf{R\ 120:} \quad M_{Rd,t,fi} = 32.75 \text{ kNm} < M_{Ed,t,fi} = 43.52 \text{ kNm.}$$

To pomeni, da ima obravnavan AB nosilec tudi z računom po metodi območij požarno odpornost glede na kriterij nosilnosti R90.

5 ZAKLJUČKI

V diplomski nalogi smo podrobneje predstavili poenostavljeni računski metodi požarne analize, ki sta v skladu s standardom SIST EN 1992-1-2:2005 namenjeni oceni požarne odpornosti enostavnih AB konstrukcijskih elementov, kot so to stebri ali nosilci. To sta metoda izoterme 500°C in metoda območij.

Pri obeh metodah požarno analizo razdelimo v dva matematično nepovezana dela. V prvem delu požarne analize izračunamo razvoj temperature v nosilcu glede na merodajni toplotni vpliv in ob upoštevanju temperaturno odvisnih toplotnih in mehanskih lastnosti materialov. Ta del imenujemo temperaturna analiza in je enaka pri obeh poenostavljenih metodah. Pri običajnih gradbenih konstrukcijah se med požarom največ toplote prenaša s kondukcijo. To opišemo s parcialno diferencialno enačbo za prevajanja toplote, medtem ko prenos toplote s konvekcijo in radiacijo upoštevamo z ustreznimi robnimi pogoji. Zaradi zahtevnosti sistem v splošnem rešimo z metodo končnih elementov.

V drugem delu požarne analize zaradi poškodovanosti betona ocenimo reducirane dimenzije prečnega prereza ter zmanjšanje trdnosti armaturnih palic. Izračunamo reducirano osno-upogibno odpornost karakterističnega prečnega prereza AB nosilca ter jo primerjamo z merodajno obremenitvijo v požarnem projektnem stanju in določimo požarno odpornost nosilca. Ta del analize imenujemo mehanska analiza. Pri metodi izoterme 500°C reducirane dimenzije prereza določimo na podlagi poteka izoterme 500°C. Pri metodi območij širino poškodovanega območja izračunamo s pomočjo razdelitve prečnega prereza na več območij, za katere ocenimo temperaturne pogoje in reducirane mehanske karakteristike. Metoda območij je natančnejša od metode izoterme 500°C.

Uporabnost predstavljenih poenostavljenih metod za oceno požarne odpornosti smo prikazali na primeru prostoležečega AB nosilca, ki se nahaja nad dnevno bivalnim prostorom v enodružinski stanovanjski hiši. Najprej smo nosilec projektirali pri običajni temperaturi po metodi mejnih stanj. Tako smo določili dimenzije prečnega prereza ter vzdolžno in prečno armaturo v nosilcu. V temperaturnem delu požarne analize smo najprej določili merodajni toplotni vpliv. Spreminjanje temperature plinov v okolici površine nosilca smo podali v obliki t.i. parametrične požarne krivulje. Pri tem smo upoštevali naslednje parametre: gostoto požarne obremenitve, pogoje prezračevanja, površino požarnega sektorja, toplotne lastnosti materiala oboda, hitrost razvoja požara, uporabo aktivnih ukrepov za preprečevanje požara in druge. V nadaljevanju smo vpliv parametrične požarne krivulje prevedli v enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru, saj sta poenostavljena postopka temeljila na standardni izpostavljenosti požaru. Razporeditev temperature po prečnem prerezu AB nosilcu smo določili s pomočjo ustreznih temperaturnih profilov. V drugem delu požarne analize smo za izbran čas trajanja požara določili reducirane dimenzije prečnega prereza ter zmanjšanje trdnosti armaturnih palic, ločeno za metodo izoterme 500°C in metodo območij. Izračunali smo reducirano osno-upogibno odpornost karakterističnega prečnega prereza AB nosilca ter jo primerjali z merodajno obremenitvijo v požarnem projektnem stanju. Tako smo določili požarno odpornost nosilca. Ugotovili smo, da je po obeh metodah požarna odpornost nosilca po kriteriju nosilnosti R90 in je večja od zahtevane, ki je R60.

VIRI

Bratina, S., 2010. Požarna odpornost armiranobetonskih elementov skladno s SIST EN 1992-1-2:2005. Seminarska naloga. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 50 str.

Bratina, S., Planinc, I. 2009. Poenostavljene računske metode projektiranja požarnovarnih nosilcev. Gradbeni vestnik 58, 4: 101-110.

Goljevšček, B. 2010. Analiza nosilnosti AB »pi« plošče v običajnih pogojih in pogojih požara. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 82str.

Gris, M. Požarne lastnosti gradbenih materialov – preskusne metode: 5 str.

<http://www2.arnes.si/~surajug/prispevek1.pdf> (Pridobljeno 15.9.2011.)

Pajek, L. Požarna zaščita betonskih konstrukcij. Referat: 8 str.

http://www.promat.si/str_pris/po%C5%BEar%20za%C5%A1%C4%8Dita%20betonskih%20konstrukcij.pdf (Pridobljeno 14.9.2011.)

Seminar evropskega raziskovalnega projekta Difisek. 2008. Projektiranje požarno varnih jeklenih in sovprežnih konstrukcij, v skladu s standardi Evrokod. Gradivo seminarja: 201 f.

http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/difisek/difisek_gradivo.pdf (Pridobljeno 17.4.2011.)

SIST EN 1990: 2005 - Evrokod 0: Osnove projektiranja konstrukcij.

SIST EN 1991-1-1: 2004 - Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije - 1-1. del: Splošni vplivi – Prostorninske teže, lastna teža, koristne obtežbe stavb.

SIST EN 1991-1-2: 2004 - Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije - 1-2. del: Splošni vplivi – Vplivi na konstrukcije, izpostavljene požaru.

SIST EN 1992-1-1: 2005 - Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij - 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

SIST EN 1992-1-2: 2005 - Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij - 1-2. del: Projektiranje požarnovarnih konstrukcij.

Srpčič. S. 2010 Požarna odpornost konstrukcij. Seminar. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 65 str.

km.fgg.uni-lj.si/PREDMETI/POK/SEMINAR_EC_1_1_2.ppt (Pridobljeno 15.9.2011.)

TSG-1-001: 2010 – Tehnična smernica: Požarna varnost v stavbah.